

# **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM RCD REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL**

**Edilson Rezende Soares**

**Mestrado em Engenharia Civil  
Área de Especialização: Estruturas  
Dissertação**

**ORIENTADOR(ES):** Professora Cristiana Nadir Gonilho Pereira  
Professor Doutor Miguel Nuno Caneiras Bravo

**Outubro de 2019**

**Dissertação submetida no Instituto Politécnico de Setúbal**



## PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS COM RCD REFORÇADAS COM FIBRA DE SISAL

Mestrado em Engenharia Civil

### DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Edilson Rezende Soares

---

(assinatura)

### DIREITOS DE COPIA OU COPYRIGHT

© **Copyright:** Edilson Rezende Soares

O Instituto Politécnico de Setúbal tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



A minha mãe Joana Soares (in memoriam) e ao meu filho Matheus Soares.

*Quem nunca errou nunca experimentou nada novo.*

*Albert Einstein*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a DEUS, pois sem Ele nada disso seria possível.

A realização da presente dissertação não teria sido possível sem a colaboração e conhecimentos técnicos de todas as pessoas envolvidas, às quais não poderia deixar de apresentar os meus agradecimentos.

À Professora Cristiana Pereira, minha orientadora científica da ESTBarreiro/IPS, pelo apoio total ao longo da trajetória desta dissertação, pelas orientações prestadas, pela vasta disponibilidade e pela busca incessante da qualidade dessa dissertação.

Ao Professor Doutor Miguel Bravo, meu coorientador científico da Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico (IST), pelas suas orientações iniciais e por ter motivado, através das suas aulas e técnicas a desenvolver este tema fantástico.

Ao técnico de laboratório, Alexandre Gamito da ESTBarreiro/IPS por toda a disponibilidade, ajuda e conhecimentos transmitidos, além de se mostrar sempre prestável com o seu enorme conhecimento em toda a produção e ensaios efetuados.

Ao meu amigo Eng<sup>o</sup> Hermógenes Júnior por confiar na minha capacidade como Engenheiro Civil e me dar apoio nos momentos mais difíceis da minha carreira, mostrando-se disponível para ajudar quando necessário.

Ao meu cunhado Luiz Carlos Maran, que sempre esteve a torcer por esta conquista, embora estivéssemos longe um do outro, os elos positivos sempre estiveram presentes.

A todos os funcionários e colaboradores que de certa forma contribuíram para esta minha conquista.

Ao meu amigo Rummenigg Borges, pelo apoio durante todo o curso e por dedicar seu tempo precioso nas horas que precisava.

Ao meu amigo Isaac Cadaxa, pelo apoio na minha chegada a Portugal.





## **RESUMO**

O desenvolvimento sustentável, como projeto político e social da humanidade, tem promovido a orientação de esforços no sentido de encontrar uma solução para as questões da sustentabilidade. A aplicação na engenharia de materiais de baixo custo de produção e de reduzido consumo de energia tornou-se, atualmente, uma exigência básica. Neste sentido, a dissertação em apreço direciona-se para as questões ambientais, na medida em que pretende estar de acordo com as questões do desenvolvimento sustentável. Neste caso, o aproveitamento dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD) contribuirá para evitar a colocação do referido material na natureza. O uso desses resíduos evitará a deposição dos mesmos em aterro, de forma muitas vezes irregular, e colaborará no aumento da taxa de reciclagem em Portugal. Por outro lado, tem-se o Sisal, planta *Agave Sisalana*, em abundância no Brasil e com concentração de 80% no Estado da Bahia. Dessa planta extraem-se as fibras. Além das fibras, pode-se aproveitar a polpa para outras finalidades. A argamassa com RCD e reforçada com fibras de Sisal contribuirá para questões sustentáveis, uma vez que essa argamassa será constituída por material reciclado e por sisal, material abundante na natureza.

A campanha laboratorial promoveu a produção de 9 tipos de argamassas: de cimento e agregado natural fino (como referência), com substituição de 50% e 100% de agregado fino natural por agregado reciclado fino e, em cada uma delas, com adição de 1% e 2% de fibra de sisal, com 30 mm de comprimento, em relação à massa de ligante. Ensaios de espalhamento, massa volúmica, teor de ar, ultrassom (módulo de elasticidade dinâmica), resistência mecânica, condutibilidade térmica, arrancamento em tijolos, porosidade aberta e absorção de água por capilaridade foram realizados nas argamassas.

Os resultados decorrentes dos ensaios referenciados, permitiu observar que, a utilização de agregado reciclado sobre a argamassa originou um aumento da resistência à compressão, elevação na capilaridade e incremento na porosidade. Na maioria dos casos, o funcionamento dos materiais compósitos, com fibras, está baseado na transferência de tensões entre a fibra de reforço e a argamassa, que permite que sejam atingidas grandes deformações antes da rutura do elemento construtivo, mesmo após a argamassa estar fendilhada, isso verificou-se durante todos os ensaios de tração e compressão, obtendo resultados excelentes nos provetes com fibras e agregados reciclados finos. Os resultados obtidos no ensaio de condutibilidade térmica consideram-se aceitáveis, onde houve uma considerável melhora.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade, Resíduos de Construção e Demolição, Fibra Natural, resistência mecânica, condutibilidade térmica.



## **ABSTRACT**

Sustainable development, as a political and social project, has prompted efforts to find solutions to sustainability issues. The application of low-cost production materials and low energy consumption has now become a basic requirement in engineering. In this sense, the present dissertation addresses environmental issues, as it intends to be aligned with the issues of sustainable development. In this case, the use of Construction and Demolition Waste (RCD) will help to prevent the disposal of this material in nature contributing to improve its life-cycle. The use of these wastes will prevent their landfilling, often irregularly, and will help to increase the recycling rate in Portugal.

On the other hand, there is the Sisal, *Agave Sisalana*. This is a common plant in Brazil, with 80% of its production occurring in the state of Bahia, from which are extracted fibers.

In addition to fibers, pulp can be used for other purposes. The RCD and Sisal fiber-reinforced in the mortar will contribute to sustainable issues, as this mortar will consist of recycled material and Sisal, a material abundant in nature.

A laboratory campaign promotes the production of 9 types of mortars: cement and fine natural aggregate (as a reference), replacing 50% and 100% of fine natural aggregate by fine recycled aggregate and with 1% and 2% sisal fiber, 30 mm long, in relation to the binder mass. Scattering, density, air content, ultrasound (electrical modulus of elasticity), mechanical resistance, thermal conductivity, brick organization, open porosity and capillary water absorption tests were performed in the mortars.

The results of the referenced tests showed that the use of recycled aggregates on a mortar resulted in increased compressive strength, increased capillarity and increased porosity. In most cases, the functioning of fiber composite materials is based on the transfer of stresses between a reinforcement fiber and a mortar, which allows large deformations to be achieved before the breaking of the building element even after the mortar is fissured. This was found throughout the splitting tensile and compression strength tests, obtaining excellent results on samples reinforced with fiber and fine recycled aggregates. The values related to thermal conductivity are acceptable, where there was a considerable improvement.

**KEYWORDS:** Sustainability, Construction and Demolition Waste, Natural Fiber, mechanical resistance, Thermal Conductivity.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	3
1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>2. EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS E PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS RCD.....</b>	<b>6</b>
2.1. FASES DOS AGREGADOS NATURAIS .....	6
2.1.1. FASE DE EXPLORAÇÃO .....	6
2.1.2. FASE DE EXTRAÇÃO .....	7
2.1.3 FASE DE PROCESSAMENTO.....	8
2.1.4 FASE DE TRANSPORTE.....	9
2.2. CENTRAIS DE RECICLAGEM .....	9
2.2.1 PROCESSAMENTO DOS RCD NAS CENTRAIS DE RECICLAGEM.....	11
<b>3. QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS NO CICLO DE VIDA DOS RCD .....</b>	<b>14</b>
3.1. IMPACTES AMBIENTAIS .....	14
3.2. DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DE DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO (DAP).....	16
3.3. IMPACTES AMBIENTAIS NO ACV DOS RCD .....	18
3.3.1. AQUECIMENTO GLOBAL .....	18
3.3.2. ACIDIFICAÇÃO .....	22
3.3.3 EUTROFIZAÇÃO.....	24
3.3.4. FORMAÇÃO DE OXIDANTES .....	25
<b>4. ARGAMASSAS.....</b>	<b>27</b>
4.1 UTILIZAÇÃO DA ARGAMASSA.....	27
4.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA .....	27
4.3. APLICAÇÃO DA ARGAMASSA .....	28

<b>5. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL .....</b>	<b>30</b>
5.1. ORIGEM E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA SISAL .....	30
5.2. MORFOLOGIA DA FIBRA DE SISAL.....	32
5.3. APLICAÇÕES DA FIBRA DE SISAL.....	32
5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA DE SISAL .....	33
5.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	34
5.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO .....	35
5.7. UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL EM CONSTRUÇÃO CIVIL.....	35
<b>6. DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL E DOS MÉTODOS DE ENSAIO .....</b>	<b>37</b>
6.1. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS .....	38
6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES .....	38
6.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL.....	38
6.2.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NATURAIS .....	39
6.2.3. PRODUÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	41
6.2.4. BARIDADE DOS AGREGADOS.....	43
6.2.5. CIMENTO.....	44
6.3. PLANO DE ENSAIO.....	45
6.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	46
6.4.1. PROCESSO DE AMASSADURA .....	47
6.5. ENSAIOS EFETUADOS NO ESTADO FRESCO.....	48
6.5.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO .....	48
6.5.3. TEOR DE AR.....	50
6.5.4. MASSA VOLÚMICA APARENTE .....	51
6.5.5 MOLDAGEM DOS PROJETOS.....	52
6.5.6. PROJETOS DE ARGAMASSA SOBRE TIJOLOS.....	53
6.6. ENSAIOS EFETUADOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	55
6.6.1. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS.....	55
6.6.2. ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO (PULL-OFF) .....	58
6.6.3. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	60
<b>7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
7.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA.....	65
7.1.1. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....	65
7.1.2. RESULTADOS DAS BARIDADES DOS AGREGADOS .....	66
7.2. RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....	66
7.2.1. RESULTADO DA RELAÇÃO ÁGUA-LIGANTE.....	66
7.2.2. RESULTADOS DAS CONSISTÊNCIAS POR ESPALHAMENTO .....	67
7.2.3. RESULTADO DO TEOR DE AR.....	67
7.2.4. RESULTADO DA MASSA VOLÚMICA APARENTE.....	68
7.3. RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	69
7.3.1. RESULTADO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E COMPRESSÃO.....	69
7.3.2. RESULTADO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO [PULL-OFF] .....	71
7.4. RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS .....	73
7.4.1. RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	73
7.4.2. RESULTADO DA POROSIDADE ABERTA.....	74
7.4.3. RESULTADO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA.....	76
7.4.4. RESULTADO DOS ENSAIOS DE ULTRASSOM – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	78
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
8.2. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO FUTURO .....	82
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Diagrama elucidativo do conceito de Desenvolvimento Sustentável .....	1
Fig. 2: Fase de exploração dos agregados . .....	7
Fig. 3: Extração dos agregados .....	8
Fig. 4: Bombagem de águas subterrâneas .....	8
Fig. 5: Central de reciclagem fixa .....	10
Fig. 6: Central de Reciclagem móvel .....	11
Fig. 7: Martelos hidráulicos .....	12
Fig. 8: Principais impactos na saúde decorrentes de PM, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> e O <sub>3</sub> .....	14
Fig. 9: Degradação das áreas de proteção permanente pelos RCD .....	15
Fig. 10: Efeito de Estufa .....	19
Fig. 11: Crescimento médio anual por década de CO <sub>2</sub> .....	20
Fig. 12: Sensibilidade à deposição de ácidos no mundo .....	22
Fig. 13: Tendências das emissões de NO <sub>x</sub> e SO <sub>x</sub> desde 1990 .....	23
Fig. 14: Cumprimento do valor-limite diário de SO <sub>2</sub> em 2016 .....	23
Fig. 15: Chapisco em parede .....	28
Fig. 16: aplicação da base .....	28
Fig. 17: Acabamento fino .....	28
Fig. 18: Fibra de sisal.....	30
Fig. 19: Mapa do Brasil onde é possível identificar os estados maiores produtores de sisal .....	31
Fig. 20: Modelagem de arrancamento para simular a interação fibra-matriz .....	33
Fig. 21: Parte utilizada da fibra de sisal na produção das argamassas .....	38
Fig. 22: Sisal cortado e pesado.....	39
Fig. 23: Mistura das areias grossa e fina.....	39
Fig. 24: Equipamentos utilizados na análise granulométrica .....	40
Fig. 25: Peneiros com os agregados retidos .....	41
Fig. 26: RCD obtidos na freguesia do Lavradio, Portugal.....	42
Fig. 27: Processo de moagem do RCD.....	42
Fig. 28: Agregados reciclados produzidos conforme curva granulométrica dos ANF ..	43
Fig. 29: Produto final da produção dos agregados reciclados .....	43
Fig. 30: Utensílios utilizados para a obtenção da baridade .....	44
Fig. 31: Baridade .....	44
Fig. 32: Sequências dos ensaios .....	46
Fig. 33: Misturador mecânico .....	46



Fig. 34: Recipientes com os materiais para a produção .....	46
Fig. 35: Recipiente com Adjuvante.....	46
Fig. 36: Materiais para a produção das amassaduras.....	47
Fig. 37: Processo de amassadura.....	48
Fig. 38: Utensílios para o ensaio de espalhamento.....	49
Fig. 39: Ensaio de espalhamento.....	49
Fig. 40: Utensílios para o ensaio do teor de ar.....	50
Fig. 41: Ensaio do Teor de Ar .....	51
Fig. 42: Utensílios para a determinação da massa volúmica aparente. ....	51
Fig. 43: Massa Volúmica.....	52
Fig. 44: Utensílios utilizados nas moldagens.....	53
Fig. 45: Provetes moldados em prismas [40 mm x40 mm x160 mm] .....	53
Fig. 46: Materiais utilizados para revestir os tijolos com as argamassa.....	54
Fig. 47: Moldagem dos tijolos .....	54
Fig. 48: Máquina para o ensaio de tração por flexão.....	55
Fig. 49: Esquema de ensaio de resistência à flexão .....	56
Fig. 50: Provetes após o ensaio.....	56
Fig. 51: Prensa para ensaios de compressão .....	57
Fig. 52: Utensílios para ensaio de arrancamento .....	58
Fig. 53: Passo a passo do ensaio de arrancamento.....	59
Fig. 54: Equipamentos para ensaio de capilaridade.....	60
Fig. 55: Ensaio de capilaridade .....	61
Fig. 56: Equipamentos para o ensaio de porosidade aberta .....	62
Fig. 57: Procedimentos para obtenção da porosidade aberta .....	63
Fig. 58: Equipamento utilizado no ensaio de condutibilidade térmica.....	63
Fig. 59: Ensaio de Ultrassom .....	64
Fig. 60: Análise da granulometria dos agregados finos.....	65
Fig. 61: Resultados do espalhamento.....	67
Fig. 62: Resultados do teor de ar das argamassas estudadas .....	68
Fig. 63: Resultado da massa volúmica aparente.....	68
Fig. 64: Resultado das resistências mecânicas.....	69
Fig. 65- Comparativo entre as resistências mecânicas .....	71
Fig. 66: Representação do tipo de rutura ocorrida nos ensaios .....	72
Fig. 67: Rutura da argamassa no suporte. ....	72
Fig. 68: Valores das tensões de arrancamento dos ensaios realizados .....	72

Fig. 69: Resultados das capilaridades após 72 horas. ....	73
Fig. 70- Curvas das capilaridades das argamassas ensaiadas.....	74
Fig. 71: Resultados da porosidade aberta.....	75
Fig. 72: Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água por capilaridade ...	75
Fig. 73: Resultados das condutibilidades térmica .....	76
Fig. 74: Relação entre a condutibilidade térmica e a porosidade aberta .....	77
Fig. 75- Relação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica no estado endurecido.....	77
Fig. 76: Resultados dos Módulos de Elasticidade Dinâmico. ....	78
Fig. 77: Relação entre o módulo de elasticidade e o teor de ar.....	79
Fig. 78- Relação entre o módulo de elasticidade e resistência a compressão.....	79

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Valores globais encontrados nas declarações ambientais para o Aquecimento Global .....	21
Tabela 2: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para o aquecimento global .....	21
Tabela 3: Valores globais encontrados nas declarações ambientais para a Eutrofização .....	24
Tabela 4: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para a Eutrofização .....	25
Tabela 5: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para o aquecimento global .....	26
Tabela 6: Principais produtos agrícolas ,produzidos nas regiões nordestina brasileira, produtoras de sisal em 2006.....	31
Tabela 7: Propriedades das fibras de sisal e de algumas fibras minerais .....	34
Tabela 8: Caracterização da fibra de sisal .....	38
Tabela 9: Características químicas, físicas e mecânicas do cimento [segundo ficha técnica]. .....	45
Tabela 10: Baridade dos agregados finos, cimento e fibra de sisal.....	66
Tabela 11: Relação água-ligante .....	66
Tabela 12: Influência da utilização de 2% de fibras de Sisal na resistência mecânica	70
Tabela 13: Resultados do arrancamento das argamassas em tijolos.....	71
Tabela 14: Resultados da condutibilidade térmica dos materiais estudados .....	76

## **SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

ACV - Análise de Ciclo de Vida  
AN - Agregado Natural  
ANF - Agregado Natural Fino  
AR - Agregado reciclado  
ARF - Agregado Reciclado Fino  
A/L - Razão água-ligante  
C&D - Construção e Demolição  
CEM - Cimento Portland  
DAP - Declaração ambiental do produto  
E - Módulo de elasticidade dinâmico  
EN - *European Norm* (Norma Europeia)  
Eq. - Equivalente  
FS - Fibra de Sisal  
IA - Impactes Ambientais  
ICV - Inventário do ciclo de vida  
IPS - Instituto Politécnico de Setúbal  
IQV - Impactes da Qualidade de Vida  
ISO - *International Organization for Standardization*  
LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
NP - Norma Portuguesa  
RCD - Resíduos de Construção e Demolição

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA

Atualmente, constata-se cada vez mais um crescente interesse relativamente ao conceito de sustentabilidade, que engloba uma produção menos poluente, controlo da poluição existente, eco-eficiência, gestão ambiental, responsabilidade social, ecologia industrial, *eco-design*, reutilização de materiais, consumo sustentável, entre outros. O desenvolvimento sustentável, como projeto político e social da humanidade, tem promovido a orientação de esforços no sentido de encontrar uma solução para este tipo de questões. Partindo para termos mais específicos, entende-se por desenvolvimento sustentável a melhoria das condições de vida da população, tendo como objetivo primordial um desenvolvimento economicamente eficaz, socialmente justo e ecologicamente sustentável. Este conceito é assim geralmente apresentado como a interseção entre o meio ambiente, a sociedade e a economia, que embora sejam entidades separadas, estão ligadas entre si (Giddings and Hopwood, 2002), como se pode ver pela análise da Fig. 1.

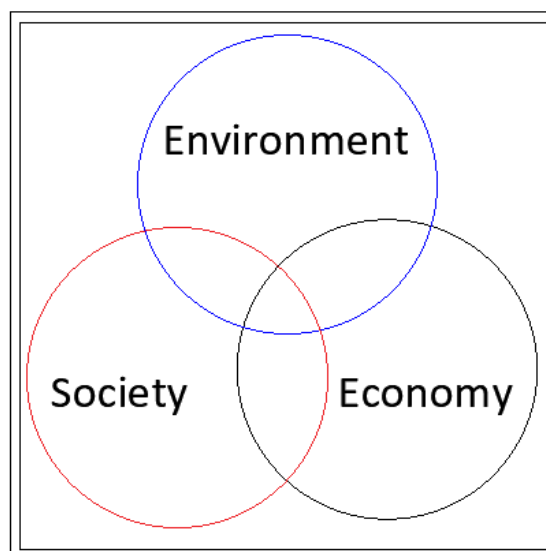


Fig. 1: Diagrama elucidativo do conceito de Desenvolvimento Sustentável  
(Fonte: Giddings and Hopwood, 2002).

Tendo em conta a proteção do meio ambiente, a indústria da construção é largamente

qualificada como uma das atividades humanas mais poluentes, uma vez que necessita de grandes quantidades de recursos naturais, como energia, água, materiais e solo, originando também grandes quantidades de resíduos que muitas vezes não são reciclados nem controlados (John, 2000). Cada vez mais é necessária uma ligação direta entre a indústria da construção e o desenvolvimento sustentável. Esta indústria é responsável por 7% do emprego em toda a economia europeia, tratando-se de um dos maiores setores em toda a Europa (Enterprise & Industry, 2009), o que em termos de desenvolvimento economicamente eficaz e socialmente justo compreende enormes benefícios. Contudo, em termos de um desenvolvimento ecologicamente sustentável, trata-se de um dos setores que causam maior impacto no ambiente, fomentando a degradação ambiental através da formação de resíduos e do consumo excessivo de energia. A sustentabilidade é reflexo da relação entre o homem e o meio ambiente, principalmente com os problemas existentes que podem deteriorar a relação entre a ecologia e o desenvolvimento económico (FEIL, 2017). Assim, na engenharia civil, a aplicação de materiais de baixo custo de produção e de operação, assim como de reduzido consumo de energia, tornam-se, atualmente, exigências básicas para alcançar o desenvolvimento sustentável (Souza et al, 1999). Quanto mais sustentável for uma obra, mais responsável esta será pelo que consome, gera, processa e descarta. Os oito passos para uma obra sustentável são:

- Aproveitamento passivo dos recursos naturais;
- Eficiência energética;
- Gestão e economia da água;
- Gestão dos resíduos na edificação;
- Qualidade do ar e do ambiente interior;
- Conforto termo-acústico;
- Uso racional de materiais;
- Uso de produtos e tecnologias amigas do ambiente.

Assim, um dos fator-chave apontados para atingir a sustentabilidade na construção passa pela minimização do consumo de recursos naturais. A incorporação dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), ao invés de recursos naturais, é assim indispensável para atingir o desenvolvimento sustentável.

O tema desta dissertação direciona-se particularmente para as questões ambientais no âmbito da engenharia civil, tendo como base o conceito de desenvolvimento sustentável. Neste caso, será avaliada a eficiência do aproveitamento dos RCD, o que contribuirá para evitar a libertação deste tipo de material no meio ambiente. As vantagens resultantes da reutilização deste tipo de resíduos são fundamentais para o sector da construção e para a sociedade em geral. O uso dos RCD evitará a sua deposição em aterro, na maioria das vezes realizada de forma irregular, além de colaborar para o aumento da sua taxa de reciclagem em Portugal que, em 2011, foi estimada em 5% (*European Comission*, 2011). Por outro lado, será também usada a fibra de sisal, planta *Agave Sisalana*, que se encontra em abundância no Brasil e com uma concentração de 80% no Estado da Bahia. Assim, a argamassa reforçada com fibra de sisal terá em conta as questões sustentáveis, uma vez que a argamassa além de ser constituída por material reciclado, é reforçada por fibras de sisal, um material renovável e que se encontra abundantemente na natureza.

A reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil tem-se vindo a fortalecer como uma prática importante para a sustentabilidade, pois além de minimizar o impacto ambiental gerado pelo setor, também poderá reduzir custos. Se compararmos o betão convencional com o betão produzido com agregados reciclados, verifica-se que em termos de facilidade de mistura, transporte, aplicação e compactação não existem diferenças significativas. Através desta substituição no betão é assim possível garantir uma redução dos impactes ambientais em todas as fases do seu ciclo de vida. O conceito de ciclo de vida compreende uma sequência de fases relacionadas com um produto, processo, serviço, instalação ou empresa (Friksel, 1997).

Em se tratando de ciclo de vida de um material, o mesmo engloba as etapas do processo de produção e comercialização, desde a origem dos recursos naturais no meio ambiente, até à deposição final dos resíduos de materiais após o uso, passando pelo transporte, armazenamento, processamento, manutenção e outros estágios intermediários (Barberi & Cazajeira, 2009).

A análise do ciclo de vida (ACV) é um instrumento de gestão ambiental, indispensável para reconhecer aspetos ambientais ao nível do produto e para determinar as áreas-chave de melhorias ambientais com vista à elaboração do novo produto (Barberi & Cazajeira, 2009). Contudo, este tipo de análise não possibilita determinar os impactes ambientais reais, mas apenas os impactes potenciais em cada etapa do ciclo de vida do produto.

No entanto, este instrumento permite comparar produtos e identificar as melhores soluções para alcançar a sustentabilidade. Uma análise de ciclo de vida é um processo complexo, já que envolve a quantificação de fluxos de energia e de recursos em cada uma das fases da vida de uma obra e a caracterização desses fluxos nas diversas categorias de impactes ambientais. Quantificar um processo completo de uma obra, englobando todas as etapas da sua vida, pode ser um processo infinito, sendo por isso necessário estabelecer objetivos e delimitar o âmbito do estudo (Gervásio, 2013).

## **1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA**

A dissertação em apreço, realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, da Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Técnico de Setúbal, tem como principal objetivo aumentar o conhecimento sobre argamassas com resíduos de construção e demolição (RCD) e o comportamento das fibras de sisal inseridas nessas argamassas.

Os RCD usados contêm cerâmica, argamassa, inertes, entre outros materiais que, após processos de moagem, irão constituir o Agregado Reciclado Fino (ARF) que será então aproveitado para a produção de argamassa. As fibras de reforço serão constituídas por Sisal. Para atingir os objetivos propostos, serão analisadas e comparadas nove misturas diferentes, seja com agregado natural fino (ANF), seja com agregado reciclado fino (ARF) ou com os dois tipos de agregado, com ou sem fibras naturais. Abaixo estão descritas as misturas.

- **100ANF** - 100% de ANF e 0% de fibra de sisal (argamassa de referência);
- **100ANF1FS** - 100% de ANF e 1% de fibra de sisal;
- **100ANF2FS** - 100% de ANF e 2% de fibra de sisal;
- **100ARF** - 100% de ARF e 0% de fibra de sisal;
- **100ARF1FS** - 100% de ARF e 1% de fibra de sisal;
- **100ARF2FS** - 100% de ARF e 2% de fibra de sisal;
- **50ANF50ARF** -50% de ANF + 50% ARF e 0% de fibra de sisal;
- **50ANF50ARF1FS** -50% de ANF + 50% ARF e 1% de fibra de sisal;
- **50ANF50ARF2FS** -50% de ANF + 50% ARF e 2% de fibra de sisal.

Neste âmbito, será produzido um total de 54 provetes de 40x40x160 [mm], 6 provetes por cada tipo de argamassa. Os provetes produzidos serão avaliados aos 28 dias de idade. Por outro lado, serão também produzidos 9 provetes que permitam a avaliação da aderência por arrancamento aos 28 dias de idade – tijolos revestidos com 2cm de argamassa.

Inicialmente, considerar-se-á um traço de 1/3 e a quantidade de água usada será determinada de forma a garantir a obtenção de uma consistência adequada à aplicação - argamassa de cimento para revestimento. A dimensão da fibra de Sisal será de 3cm.

Para aferir o desempenho das argamassas produzidas, estas serão caracterizadas quer no estado fresco, quer no estado endurecido. Pretende-se assim estimar a adequabilidade das argamassas produzidas argamassas para reboco. No estado fresco, será avaliada a consistência por espalhamento, a massa volúmica aparente e o teor de ar. Sempre que possível serão utilizados procedimentos constantes nas normas em vigor.

Por outro lado, nas argamassas em estado endurecido serão avaliados os desempenhos mecânicos (resistência à tração por flexão e resistência à compressão; módulo de elasticidade dinâmico; aderência por arrancamento) e físicos (massa volúmica aparente e específica; porosidade aberta; absorção de água por capilaridade e condutibilidade térmica) através também da utilização de procedimentos presentes nas normas em vigor.

### **1.3. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Com vista à realização da presente dissertação realizou-se, primeiramente, uma investigação e um levantamento da literatura bibliográfica sobre o tema em análise. A dissertação em apreço é constituída por seis capítulos, divididos em vários subcapítulos.

O primeiro capítulo consiste numa introdução ao tema abordado, apresentando o conceito de desenvolvimento sustentável e expondo os problemas gerais que a indústria da construção enfrenta, relativamente aos impactes ambientais produzidos e à deposição ilegal dos resíduos resultantes da construção e demolição de edifícios e infraestruturas. A gestão destes resíduos é mencionada, quer a nível europeu, quer mais especificamente a nível português. No final do capítulo, surgem os principais objetivos



a ter em conta na realização desta investigação, assim como as abordagens e metodologias selecionadas.

O segundo capítulo deste trabalho abrange uma descrição detalhada dos processos de exploração dos recursos naturais e de produção dos RCD, assim como uma exposição da produção dos agregados naturais e reciclados do betão. Neste capítulo são também mencionadas as centrais de reciclagem de agregados, móveis e fixas, assim como o processamento dos agregados reciclados.

O terceiro capítulo abrange a quantificação das categorias de impacto ambiental consideradas para este trabalho, tendo em conta os valores retirados das declarações ambientais do produto (DAP), correspondentes a cada categoria de impacto.

O quarto capítulo refere-se as argamassas, suas propriedades e aplicações.

O quinto capítulo abrange a influência do uso de fibras naturais nas argamassas, assim como as propriedades químicas e estruturais da fibra de sisal.

O sexto capítulo aborda casos de estudo, sendo analisados nove cenários, de forma a no final compará-los e obter os resultados finais da dissertação, tendo como objetivo primordial identificar o melhor cenário.

O sétimo e último capítulo descreve as análises e discussões dos resultados.

## **2. EXPLORAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS E PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS RCD**

Como já foi referido nesta dissertação, os resíduos de construção e demolição (RCD) são maioritariamente compostos por betão, asfalto, impurezas, solo e lamas, pedras, brita, madeira, tijolo, vidro, outros orgânicos, tubos de plástico, areia, metais.

A utilização significativa dos resíduos da construção e demolição (RCD) começou a ser mais evidente após a Segunda Guerra Mundial, em virtude da grande quantidade de destroços originados, bem como devido à urgência de satisfazer a grande procura de materiais de construção (Pinto, 2005). Essa utilização acaba por beneficiar o meio ambiente e colaborar com a redução dos impactes ambientais provocados pela extração de recursos naturais.

### **2.1. FASES DOS AGREGADOS NATURAIS**

A pedra, a areia e o cascalho são as fontes primárias de agregado natural, que são usadas diretamente na construção ou como matéria-prima para a construção de outros produtos, tais como o betão, por exemplo (USGS, 1999). Atualmente, tem sido cada vez maior a importância dada à reciclagem dos agregados, uma vez que permite o aumento da sua vida útil, além de reduzir os impactos ambientais ao redor dos locais de construção (Wilburn & Goonan, 1998).

#### **2.1.1. FASE DE EXPLORAÇÃO**

A exploração das jazidas de agregados naturais trata-se de um processo que implica a interação entre os produtores de agregados e a comunidade local. Na década de 1960 (década do desenvolvimento da construção), muitas fontes de agregados foram esgotadas e substituídas por outras construções. Por outro lado, as especificações utilizadas para determinar a qualidade dos agregados tornaram-se mais exigentes e rigorosas, o que levou a que a exploração de recursos naturais se tornasse mais difícil (Langer, 1993).

Antes de se iniciar a fase de exploração, deve proceder-se a uma avaliação geológica preliminar, onde os mapas topográficos, relatórios de engenharia e geólogos ajudam a definir a melhor localização a explorar. Após a realização desta investigação preliminar,

devem realizar-se estudos detalhados, que já vão englobar imagens de satélite, fotografias aéreas e estudos geofísicos, com o intuito de definir os limites das potenciais fontes de agregados com mais precisão. Na realização destes estudos, deve recorrer-se à utilização de retroescavadoras, cuja função é retirar amostras do solo e camiões, utilizando brocas perfurantes que podem recolher amostras do subsolo profundo (Fig. 2). Por outro lado, os estudos geofísicos são também usados para determinar a espessura de material sobrejacente estéril, com o objetivo de detetar as mudanças (mudanças de cascalho para areia ou xisto de arenito). A exploração de recursos naturais não é geralmente prejudicial para o meio ambiente, sendo as aberturas de valas e poços de escavação fáceis de ser corrigidos (Drew et al., 2004).



Fig. 2: Fase de exploração dos agregados (Fonte: Pedrosa, 2016).

Após a escolha do local de exploração, inicia-se então a mineração dos agregados. A mineração dos agregados compreende a remoção de camadas de terra, com o intuito de expor a areia, cascalho ou pedra, onde o solo orgânico retirado é separado do resto do material removido. Após a remoção dos obstáculos, são construídas vias de circulação, instalações de tratamento e manutenção, infraestruturas e outras plantas, usando técnicas de construção padrão. Os métodos para a mineração de agregados condicionam-se pelo tipo de material a ser escavado, condições naturais do local e produto final desejado.

#### 2.1.2. FASE DE EXTRAÇÃO

A extração implica a retirada da areia e cascalho das minas a céu aberto e dragados de depósitos subaquáticos. Em determinadas áreas, como os leques aluviais, terraços altos ou depósitos de água de gelo glacial, a areia e o cascalho podem ser secos, sendo extraídos através de equipamentos de terraplanagem convencionais, como escavadeiras ou niveladoras, por exemplo (Fig. 3). Quando, por outro lado, os poços de areia e cascalho penetram em lençóis freáticos, a extração pode ser efetuada a seco, recolhendo e bombeando as águas subterrâneas (Fig. 4).



Fig. 3: Extração dos agregados (Fonte: Marlene on the move, 2018.)



Fig. 4: Bombagem de águas subterrâneas (Fonte: Mundo Educação, s.d.)

Após a bombagem das águas subterrâneas, a areia e o cascalho podem ser extraídos através de técnicas de mineração seca. Em algumas áreas, tais como várzeas ou terraços baixos, pode não ser prática a bombagem de um poço, podendo-se optar por extrair o material usando técnicas de mineração molhada. Neste caso, o material é extraído com recurso a reboques, baldes ou dragas hidráulicas (Drew et al., 2004). Se, por outro lado pensarmos na extração de brita, verificamos que esta difere da extração de areia e cascalho, pois na maioria das situações a base deve ser perfurada e queimada. Neste caso, os buracos são perfurados na rocha e parcialmente preenchidos por explosivos. A explosão total dura apenas uma fração de segundo e é composta por pequenas explosões separadas por milésimos de segundos, quebrando a rocha em pedaços apropriados para esmagar.

### 2.1.3 FASE DE PROCESSAMENTO

A fase de processamento dos agregados naturais pode ocorrer em locais remotos, usando equipamentos de britagem e crivagem ou numa central constituída de equipamentos sofisticados, interligados através de vários tapetes rolantes. Quase todo

o equipamento presente na central pode ser controlado através de um computador ou de uma pessoa situada numa torre de controlo de localização central (Drew et al., 2004). O processamento reside geralmente no transporte dos agregados para a central, de forma a passarem pela britagem, trituração, lavagem, armazenamento e abastecimento. Normalmente, camiões ou correias transportadoras levam o material para um britador primário. Seguidamente, o material é triturado e transportado num tapete rolante para um britador secundário, passando por um crivo vibratório, onde o material é separado consoante o tamanho (Langer, 1993). Depois desta separação, o produto que esteja conforme os padrões requeridos será transportado para o armazém de produto final. O material com grandes dimensões que não foi selecionado é então reintroduzido no processo no britador de impacto, formando um ciclo fechado. Dependendo do tipo de material a ser processado e do produto final, o material pode ser lavado. Após a triagem, classificação por tamanho e lavagem (se necessário), os tapetes rolantes transportam o material para depósitos e, após a sua venda, o produto é carregado através de camiões para o seu destino final (Langer, 1993).

#### **2.1.4 FASE DE TRANSPORTE**

O cronograma de entrega, volume transportado, distância a percorrer e disponibilidade dos meios de transporte vão definir o meio de transporte usado para os agregados. Maioritariamente, o transporte dos agregados realiza-se em camiões (por estrada), pois estes têm a facilidade de poder ser rapidamente carregados nos pontos de origem e largar as suas cargas no seu destino, além de poderem transportar cerca de 25 toneladas, tornando os custos de entrega eficientes (Drew et al., 2004). Por outro lado, na pedreira, com o intuito de facilitar o transporte, podem ser construídas pistas de aceleração e desaceleração, incrementando a eficiência dos camiões que entram e saem de forma mais suave. Nesta linha de pensamento, deve também ter-se em consideração a pavimentação das estradas de acesso à pedreira, limitando o número de entradas e saídas, tal como procedimentos de lavagem de rodas para minimizar a quantidade de material rastreado nas estradas adjacentes. Nos casos em que as pedreiras beneficiam de acesso ferroviário, o transporte férreo pode ser mais económico do que o transporte efetuado por um camião. Contudo, para mover agregados por via-férrea, a central deve possuir um meio para carregar e descarregar os agregados no ponto de entrega e, se não forem usados no ponto de entrega, um sistema para posterior distribuição.

## **2.2. CENTRAIS DE RECICLAGEM**

A construção de uma central de reciclagem é um investimento que quer uma análise de viabilidade prévia. Para se definir um correto dimensionamento da central, deve-se ter em conta os seguintes fatores (Leite, 2001):

- volume de RCD passível de ser reciclado;
- tipo de material e objetivo de aplicação;
- local de instalação de estação de reciclagem.

O local ideal para a instalação da estação da reciclagem deve preferencialmente ser junto à origem dos RCD. Todavia, este facto apresenta o inconveniente de sobrecarregar o tráfego, o que faz com que a instalação das plantas de reciclagem se coloque em zonas contíguas aos aterros, reduzindo assim os custos inerentes e facilitando o transporte.

O tipo de material e o objetivo de aplicação é um aspeto importante economicamente, porque quanto mais elevadas forem as necessidades de triagem, mais elevados serão os custos, sendo necessário analisar a viabilidade do projeto.

As centrais de reciclagem fixas (Fig. 5) são estacionárias (estão sempre no mesmo local), implicando o transporte dos materiais que se quer processar até às mesmas. Estas centrais ocupam uma grande área, pois são constituídas por várias instalações, o que implica a necessidade de vários circuitos de transporte, diversos crivos, fases de triagem e dois ou mais britadores.



Fig. 5: Central de reciclagem fixa (Fonte: Portal dos Resíduos Sólidos, s.d.)

Quanto às centrais de reciclagem móveis (Fig. 6), são estas que são levadas para o local onde são produzidos os RCD, independentemente do elemento a demolir e devem ser adaptadas às suas características, tendo geralmente uma entrada única de alimentação, uma cinta transportadora, uma britadora e um ou dois peneiros diferentes. Estas centrais prescindem de transporte devido à sua localização, o que é a grande vantagem das centrais móveis (Vázquez et al., 2006).





Fig. 6: Central de Reciclagem móvel (Fonte: Portal dos Resíduos Sólidos, s.d.)

Outra das vantagens das centrais móveis é o facto de poderem não necessitar de grande área para implantação. Observa-se, também, a ausência de custos e impactos ambientais associados ao transporte do material a processar, bem como o menor tempo de instalação.

Em relação às desvantagens desses procedimentos, refira-se que as centrais fixas permitem obter produtos reciclados mais diversificados e de melhor qualidade do que os produzidos pelas unidades móveis, bem como a possibilidade de utilização de equipamentos maiores e mais potentes nas centrais fixas que permitem melhorar o processo de trituração, remoção de impurezas e crivagem.

#### 2.2.1 PROCESSAMENTO DOS RCD NAS CENTRAIS DE RECICLAGEM

O processamento dos RCD nas centrais de reciclagem é muito semelhante ao processamento dos agregados naturais, utilizando-se maioritariamente os mesmos equipamentos. As etapas do processamento dos RCD nas centrais de reciclagem compreendem: aceitação do fluxo de resíduos; pré-triagem e separação inicial; triagem e seleção dos fluxos contaminados; britagem; crivagem; armazenamento e saída dos produtos finais (Pereira et al., 2004). Em se tratando do fluxo de resíduos aceitos nas centrais, e com o intuito de assegurar a qualidade e a redução do custo de produção dos agregados, os materiais a serem reciclados devem ser destituídos de contaminantes e separados por fluxos. Esta separação na origem deve ser o mais eficiente possível, através da demolição e recolha seletiva de resíduos, dando preferência a elementos de betão ou cerâmicos, de modo a não conter quantidades significativas de outros minerais e matérias orgânicas. Quanto aos resíduos contaminados, operações como a separação mecânica, manual, por imersão ou por correntes de ar, incrementam os custos associados, o que, conseqüentemente, se vai refletir no preço de venda dos agregados reciclados, reduzindo o seu interesse para o consumidor. Assim, na impossibilidade de uma separação mais específica, exige-se a utilização de contentores de recolha dotados de separação física de fluxos minerais e

não minerais. Assim, a recolha em estaleiro deverá prever contentores com separadores para materiais de betão, cerâmicos e outros materiais, como madeira, papel, plásticos, isolantes e gesso. Contudo, para aplicações mais exigentes, deverá prever-se a separação em fluxos, dentro do próprio fluxo de matérias minerais.

Por outro lado, a determinação do potencial de reutilização de qualquer betão estrutural trata-se de uma vantagem interessante, podendo ser realizada através da análise de registos da composição, qualidade e historial do betão original. Relacionado a pré-triagem e separação inicial, parte-se do princípio que quando os materiais chegam à central de reciclagem já estão desprovidos de materiais indesejáveis. Contudo, preventivamente, assegura-se a qualidade de toda a entrada e saída de material através de uma triagem manual, aquando da descarga do material.

Esta triagem tem o objetivo de reduzir a quantidade de impurezas, sendo ainda registadas as quantidades e características dos materiais movimentados, o que é também vantajoso. Posteriormente, os fluxos separados de materiais limpos, como betão e alvenarias, são submetidos a um processo de pré-segregação, crivo primário, com o objetivo de remover a fração 0-5 mm.

O material restante é então britado. Por outro lado, os fluxos de betão armado, particularmente os elementos de maiores dimensões, são depositados e, com a ajuda de um martelo hidráulico (Fig. 7), são reduzidos, usando-se ainda uma pinça para retirada da maioria das armaduras.

Relativamente aos materiais contaminados, estes são depositados e encaminhados para uma zona diferente, onde irão passar por um circuito de triagem mecânica e manual, devendo sair limpos, para prosseguir o processamento normal, que ocorre com os materiais não contaminados. O aço proveniente das peças de betão será então armazenado em contentores para depois ser reencaminhado e reciclado.



Fig. 7: Martelos hidráulicos (Fonte: Hidrau Box, s.d.)

Em preocupação com a triagem e seleção dos fluxos contaminados, vale a pena lembrar que os resíduos que dão entrada na central são depositados, passando de seguida para



uma unidade de triagem com grelha vibratória e separador magnético, que visa separar os diferentes fluxos de resíduos, onde são retirados os elementos de maior dimensão e visibilidade. Os fluxos de resíduos que passaram primeiramente à entrada na inspeção e são indesejáveis são separados.

Seguidamente, os agregados mais pequenos (entre 0 e 5 mm) são separados por intermédio de um crivo vibratório. Destes processos, devem ser separadas as seguintes frações: resíduos diversos, tais como plásticos, madeiras, metais, papéis ou cartões, e minerais de fração fina. Os minerais de fração grossa, por outro lado, prosseguem para tratamento.

Além deste processo, existem outros que podem complementar os supracitados, tais como a separação mecânica dos resíduos, separação por via húmida por densidade e separação por correntes de ar. Os materiais que vão ser britados apresentam na sua composição resíduos selecionados, visando a obtenção de índices de contaminação mínimos.

A britagem é realizada através da utilização de uma britadora de impacto ou de mandíbulas, com capacidade de reduzir os resíduos às dimensões desejadas, através do esmagamento das partículas. Assim, os parâmetros reguláveis da britadora devem ser ajustados em função do produto final que se pretende obter.

Cada britador é mais adequado a uma determinada função, sendo que o britador de mandíbulas produz melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados para o uso em betão, enquanto que o britador de impacto possui uma câmara onde o material é britado através de choques provenientes de placas fixas e de martelos fixados por um rotor (Lima, 1999).

À saída da britagem, o produto passa ainda por um separador magnético que retira os restos de metal ainda existentes no fluxo. Finalmente, todo o material que não esteja separado fisicamente e que passou nos processos desejáveis supracitados é armazenado.

Deve-se ainda garantir que todos os stocks são separados por uma distância de pelo menos 4 m, de modo a evitar misturas entre os vários stocks de diversas composições. Todos os stocks deverão também ser identificados e supervisionados por um responsável nas ações de depósito e carga de material.

### 3. QUANTIFICAÇÃO DOS IMPACTES AMBIENTAIS NO CICLO DE VIDA DOS RCD

O capítulo em apreço compreende uma descrição dos impactes ambientais e do controlo dos mesmos nas centrais de reciclagem. Neste capítulo, serão também quantificadas as principais categorias dos impactes ambientais presentes nos agregados reciclados e naturais, inseridos no seu ciclo de vida e da variabilidade dos valores encontrados para cada categoria ambiental.

#### 3.1. IMPACTES AMBIENTAIS

Quando falamos de impactes ambientais podemos imediatamente associá-los ao setor da construção civil, embora este não seja o único responsável pelos mesmos. Contudo, este setor desempenha um papel significativo nesta matéria, visto que consome entre 14% e 50% de toda a matéria-prima extraída da natureza, 16% de recursos hídricos e 40% de toda fonte de energia (Tavares, 2006). Além disso, gera de 40% a 70% dos resíduos sólidos e, ainda, é responsável por 10% das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, o que além de ter impactes a nível ambiental, prejudica também a saúde humana (Fig. 8).

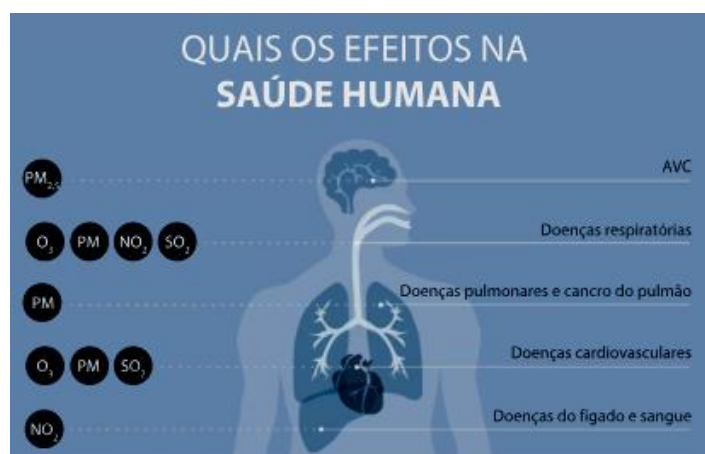


Fig. 8: Principais impactos na saúde decorrentes de PM,  $NO_2$ ,  $SO_2$  e  $O_3$

Fonte: AEA & OMS, 2018

Atualmente, o consumo de materiais pela construção civil nas cidades é cada vez mais elevado, sendo que cerca de 75% dos resíduos gerados pela indústria de construção são provenientes de obras de construção e demolição. A lacuna que se faz sentir nas políticas públicas destinadas a ordenar o percurso dos RCD nas cidades provoca inúmeros impactes ambientais, tais como a degradação das áreas de proteção permanente (Fig. 9), proliferação dos agentes transmissores de doenças, obstrução dos sistemas de drenagem, ocupação de vias públicas por resíduos e degradação da paisagem urbana.



Fig. 9: Degradação das áreas de proteção permanente pelos RCD (Fonte: Janine Moraes/ABr).

Por outro lado, verifica-se que a indústria de extração implica problemas ambientais consideráveis, devido ao consequente contacto com as camadas geológicas. A extração dos agregados naturais origina grandes problemas no local de exploração de uma pedreira, assim como nas zonas onde estes são transportados. A solução indicada para minimizar estes impactes ambientais reside no uso de tecnologias limpas. Poderemos assim concluir que este setor apresenta também um potencial elevado para procurar soluções sustentáveis que minimizem os impactos gerados pela sua atividade.

Através dos exemplos fornecidos, podemos ainda definir os impactes ambientais como alterações no meio ambiente ou em alguns dos seus componentes que são despoletadas por uma determinada ação ou atividade. Estas alterações no ambiente podem ser quantificadas em grandes ou pequenas e qualificadas em positivas ou negativas.

A importância do estudo e análise dos impactes ambientais reflete-se na prevenção dos mesmos, uma vez que é possível avaliar-se as consequências de certas ações, determinando a importância das mesmas para a qualidade do ambiente (Nascimento, 2009).

Uma vez que os RCD além de serem maioritariamente originários e aplicados posteriormente nos meios urbanos, a proximidade das centrais de reciclagem a estes meios apresenta inúmeras vantagens quer a nível da redução de custos, quer a nível da diminuição dos impactes recorrentes do transporte. Contudo, esta proximidade acarreta também algumas desvantagens relacionadas com a poluição, pois dá-se a geração de resíduos e poeiras que lava ao descontentamento da população.

Assim é importante realizar-se um balanço entre as vantagens e desvantagens para

cada caso em concreto, estimando para isso a quantidade de RCD que será gerada numa determinada área urbana. Está definido que, para se estimar a quantidade de RCD gerados numa área urbana determinada, se deve ter em conta três indicadores:

- quantidade de resíduos provenientes dos edifícios novos construídos nessa área num determinado período de tempo;
- quantidade de resíduos oriundos de ampliações;
- quantidade de resíduos removidos, devido às deposições irregulares.

Lima (1999) defende que para diminuir a emissão de pó e ruídos nas centrais de reciclagem devem ser tomadas as seguintes medidas:

- colocação de vegetação ao longo do perímetro da central, com o intuito de conter o pó e o ruído originados, além de melhorar o aspeto físico da unidade;
- instalação de aspersores nos locais de receção dos resíduos e de armazenamento de agregados reciclados, diminuindo assim a dispersão de poeiras;
- redução das alturas de descargas do material em todos os pontos de transferência de resíduos, o que também apresentará vantagens em termos de dispersão de poeiras.

Como já foi referido nesta dissertação, os impactes ambientais podem ser decorrentes dos agregados naturais provenientes da indústria da extração e também dos agregados reciclados provenientes da reciclagem dos RCD. Assim, os impactes ambientais podem ser divididos em duas categorias (Barreiros et al., 2003):

- impactes no meio ambiente (IA);
- impactes na qualidade de vida (IQV), dependentes do Homem, nas zonas urbanas.

### **3.2. DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DE DECLARAÇÕES AMBIENTAIS DE PRODUTO (DAP)**

Uma Declaração Ambiental de Produto (DAP; EPD - *Environmental Product Declaration*) terá de ser elaborada por uma terceira parte, de acordo com a norma ISO 14025, e compreenderá a informação relativa aos aspetos ambientais, com base numa ACV, de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida.

A ACV, como já foi referido nesta dissertação, trata-se de uma técnica destinada a avaliar os potenciais impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, de forma quantitativa (ABNT, 2009a), tornando-se assim numa ferramenta sistemática de gestão ambiental que analisa e avalia de forma holística os impactos ambientais de um produto ou processo.

O ciclo de vida das edificações divide-se em quatro fases: a fase de produção de materiais; a fase de construção, a fase de uso e a fase de fim de vida, na qual está contemplada a demolição. Assim, os materiais de construção que após o fim da vida podem ser reciclados ou reincorporados nos processos representam benefícios ambientais.

A declaração ambiental do produto (DAP) corresponde assim a um documento emitido pelas empresas, tendo como função primordial a divulgação dos impactes ambientais decorrentes de um determinado produto, ao longo do seu ciclo de vida (Sanne et al., 2008). Assim, estas declarações permitem ao mercado, através das informações fornecidas, seleccionar os produtos que têm menores impactes ambientais.

As DAP são constituídas por três partes principais, em que a primeira descreve o produto e o seu fabricante, além de poder incluir também a unidade funcional que está a ser utilizada. Quando a unidade funcional não integra a primeira parte, surgirá na segunda, refletindo a função real do produto. A segunda parte compreenderá sempre o desempenho ambiental do produto, sendo por isso a de maior relevância, sendo aqui considerados todos os processos durante o ciclo de vida do produto, desde a extração de recursos, passando pelas matérias-primas e transporte, culminando na produção final.

As emissões de água e de ar são expressas como dados do inventário e consequentemente influenciarão as diferentes categorias dos impactes ambientais. O consumo de recursos é também abordado nesta parte, dividindo-se em recursos renováveis e não renováveis, podendo ainda incluir-se uma apresentação do impacte ambiental do transporte típico para o cliente (Sanne et al., 2008). Por fim, a terceira parte incluirá a informação da empresa, assim como o organismo de certificação, prazo de validade e referências.

Esta certificação realizada por uma parte independente não é obrigatória, mas aumenta a credibilidade da DAP.

A DAP pode apresentar, entre outros, os seguintes indicadores (Torgal & Jalali, 2008):

- consumo de energia não renovável;
- consumo de energia renovável;
- potencial de aquecimento global;
- potencial de degradação da camada de ozono;
- potencial de acidificação;
- potencial de eutrofização.

Estas declarações apenas poderão ser compreendidas por um especialista na área, uma vez que apenas disponibilizam os resultados, sem apresentar conclusões gerais para o entendimento do público em geral. Diversas empresas multinacionais já aplicaram DAP aos materiais de construção produzidos pelas próprias.

De forma a garantir confiabilidade nos resultados publicados nas DAP, estas terão obrigatoriamente de seguir as Regras para a Categoria de Produto (RCP). O documento RCP integra as linhas orientadoras para a execução das declarações e inclui: parâmetros a declarar, etapas do ciclo de vida a ter em consideração, informação ambiental adicional, condições de comparação de produtos, informação para verificação e registo das declarações nas bases de dados. A informação obtida na terceira fase da ACV, avaliação de impacte, é incorporada nas declarações publicadas nas bases de dados e corresponde a uma fonte de informação relevante acerca dos impactes dos

produtos.

Assim, com o objetivo de obter os valores ambientais para as diferentes categorias de impactos ambientais dos produtos que constituem os RCD, é importante ter em linha de conta as declarações ambientais do produto (DAP) de várias empresas, de modo a comparar os valores e no final tirar as conclusões pretendidas. A declaração ambiental do produto (DAP) corresponde a um documento emitido pelas empresas, tendo como função primordial a divulgação dos impactos ambientais decorrentes de um determinado produto, ao longo do seu ciclo de vida (Sanne et al., 2008). Assim, estas declarações permitem ao mercado, através das informações fornecidas, selecionar os produtos que têm menores impactos ambientais.

### **3.3. IMPACTES AMBIENTAIS NO ACV DOS RCD**

O ciclo dos RCD implica impactos decorrentes dos consumos de recursos naturais, que podem ser renováveis ou não renováveis, parte dos quais energéticos, das emissões (aquecimento global, acidificação, formação de oxidantes e destruição de ozono) e da libertação dos poluentes com substâncias tóxicas (originando ecotoxicidade e toxicidade humana).

#### **3.3.1. AQUECIMENTO GLOBAL**

O aquecimento global pode ser definido como o aumento da temperatura média do planeta Terra. As principais evidências deste fenómeno resultam nas medidas de temperatura fornecidas pelas estações meteorológicas desde 1860, pela observação das variações da cobertura de neve das montanhas e de áreas geladas, do aumento do nível global dos mares, do aumento das precipitações e da cobertura de nuvens (Vieira & Bazzo, 2007). Durante o século XX, os aumentos mais significativos registaram-se de 1910 a 1945 e 1976 a 2000 (Vieira & Bazzo, 2007). As atividades humanas, passando pelo uso de combustíveis, desflorestação, produção animal têm sido as principais causas apontadas para este aumento de temperatura no globo (Radner & Dutta, 2009).

Por outro lado, o aquecimento global está intimamente relacionado com o efeito de estufa. Este efeito reflete-se na radiação solar que atravessa a atmosfera e é absorvida pela terra, sendo este calor perdido a partir da superfície terrestre através da radiação infravermelha. Contudo, a radiação infravermelha não sai da atmosfera na mesma proporção em que a radiação solar entra, uma vez que algumas radiações ficam presas por uma série de gases, que agem como um vidro, fazendo com que o calor entre na atmosfera, mas não saia resultando no efeito de estufa (Nettleman & Khasnis, 2005). O efeito de estufa (Fig. 10) é uma característica inerente e indispensável à atmosfera terrestre, dando equilíbrio à terra em termos de temperatura, pois se este não se verificasse a temperatura do planeta seria bastante mais reduzida. Contudo, o efeito de estufa tem vindo a aumentar, potenciando os problemas decorrentes do aquecimento global terrestre, tais como:

- aumento do nível global dos oceanos e mares;

- diminuição da cobertura de neve nas montanhas e áreas geladas;
- aumento dos períodos de seca;
- aumento da intensidade dos furacões;
- aumento da intensidade e frequência das inundações.

Para analisar a problemática do aquecimento global, têm sido organizados vários eventos, como o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), encontro realizado a cada cinco anos para analisar e discutir a elevação da temperatura do nosso planeta e o Protocolo de Kioto, acordo entre governantes de vários países com o objetivo de reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, especialmente o  $\text{CO}_2$ , proposto em 1997 e retificado em 2005 (Vieira & Bazzo, 2007).

Relacionado aos gases do efeito estufa destacam-se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e os clorofluorcarbonetos (CFCs). Atualmente, as concentrações destes gases estão a aumentar, aumentando o efeito de estufa natural da Terra, como foi referido. A Fig. 10 apresenta esses fenómenos.

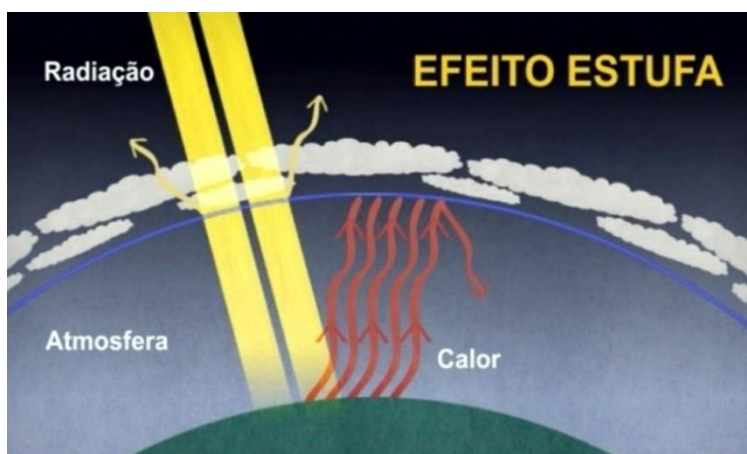


Fig. 10: Efeito de Estufa (Rádio Regional, 2018).

Asif, Muneer e Kelley (2007) compararam a influência de vários materiais constituintes dos RCD, tais como madeira, alumínio, vidro, betão e telha cerâmica, em termos do seu impacto no aquecimento global, concluindo que o betão, a madeira e a cerâmica são os materiais mais prejudiciais em relação a este aspeto.

O dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , trata-se de um composto químico produzido através da respiração humana, da decomposição das plantas e das combustões. Este composto é essencial para a ocorrência de vida no planeta, pois é um dos elementos imprescindíveis para a realização da fotossíntese, processo em que os organismos transformam a energia solar em energia química (Park et al., 2007). Contudo, a sua concentração em excesso pode acarretar problemas graves, especialmente quando associado à desflorestação do planeta.

A concentração deste gás tem aumentado na atmosfera ao longo dos anos de cerca de 275 ppm no século XVIII, para cerca de 355 ppm no início do século XXI (período pré-industrial), aumentando cerca de 40% e tornando-se o valor mais elevado nos últimos

séculos (Fig. 11). Este facto fica-se a dever essencialmente à produção de cimento para o fabrico do betão e à queima de combustíveis fósseis. Se as emissões de CO<sub>2</sub> continuarem a crescer com a mesma intensidade, perspectiva-se que em 2100 a concentração deste gás chegue aos 550 ppm (Park et al., 2007).

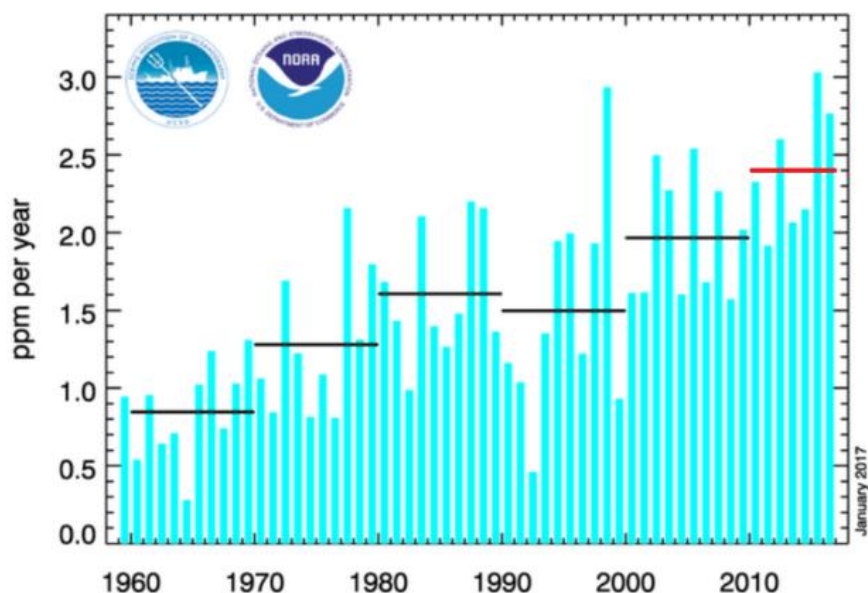


Fig. 11: Crescimento médio anual por década de CO<sub>2</sub> (Fonte: Nora, 2012).

O aumento da concentração do dióxido de carbono apresenta assim impactes negativos, na medida em que potencia a capacidade da atmosfera em reter o calor e, consequentemente o aquecimento global.

O metano, CH<sub>4</sub>, trata-se de um composto químico formado nas regiões húmidas da terra através de térmitas ou da desintegração de matérias orgânicas. Este gás apresenta uma grande estabilidade termodinâmica, sendo por isso encontrado nos depósitos de petróleo, nas lavas vulcânicas ou em hidratos de gás no fundo dos mares e oceanos. Por outro lado, o metano reage com o oxigénio nas áreas vulcânicas, formando o dióxido de carbono que sai dos vulcões (Laitner et al., 2001). As elevadas concentrações de metano surgem também muitas vezes associadas à produção animal, especialmente à criação de bovinos leiteiros. A concentração deste gás aumentou de cerca de 0,80 ppm desde o período pré-industrial, até 1,75 ppm no início do século XXI, o que decorreu essencialmente das fontes de combustíveis fósseis, queima de biomassas e aterros, cultivo de arroz e criação de animais (Laitner et al., 2001).

O óxido nitroso, N<sub>2</sub>O, é produzido pelas florestas tropicais e pelos oceanos. As emissões deste gás são um subproduto da produção de adípico e ácido nítrico, sendo resultantes da produção industrial destes ácidos, assim como das fontes móveis e da agricultura (Laitner et al., 2001). Este gás é altamente potenciador do efeito de estufa, sendo que uma molécula de N<sub>2</sub>O equivale a 250 moléculas de CO<sub>2</sub> em termos de potencial de efeito de estufa e permanece mais tempo no ar, com uma média de 125 anos. A



concentração do óxido nitroso no período pré-industrial era de cerca de 275 ppb, aumentando no início do século XXI para 314 ppb, a uma taxa de 0,25% por ano.

Os clorofluorcarbonetos, CFCs, tratam-se de um grupo de compostos antropogénicos que são constituídos por cloro, flúor e carbono. Estes gases só surgiram na atmosfera terrestre após 1950, sendo atualmente amplamente utilizados em refrigerantes, sprays e espumas. Os CFCs são responsáveis pela destruição da camada do ozono, facilitando a entrada dos raios UV na atmosfera terrestre e causando problemas graves para a saúde humana, como por exemplo as cataratas e o cancro de pele. Este grupo de gases apresentava uma concentração de 268 ppt no início do século XXI, estimando-se um aumento considerável ao longo do tempo devido ao seu longo período de vida.

Os efeitos dos gases de estufa decorrem de múltiplos gases, como já foi abordado, sendo usualmente referenciados de dióxido de carbono equivalente, CO<sub>2</sub> eq. Assim, o consumo de energia produz gases de efeito de estufa (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e clorofluorcarbonetos) que são convertidos em CO<sub>2</sub> eq. de acordo com as quantidades que o efeito de estufa produz, facilitando assim a quantificação e comparação das diferentes emissões.

A Tabela 1 mostra os valores globais ambientais descritos nas declarações para a categoria do aquecimento global e, em duas das fontes (Tabela 2), os valores são detalhados, contendo informações adicionais sobre a extração, transporte e processamento dos agregados.

Tabela 1: Valores globais encontrados nas declarações ambientais para o Aquecimento Global (Fonte: Bogliolo, 2006; BDZ, 1996; Turk Young, 2011).

Fontes/ Categoria	Aquecimento Global (Kg/CO <sub>2</sub> eq.)
Bogliolo (2006)	237,03
BDZ (1996)	251
Turk Young (2011)	191,6

Tabela 2: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para o aquecimento global (Concretape, 2005; Buzzi Unicem, 2006).

Categorias/ Fontes	Extração	Processamento	Uso	Fim de Vida	Valor Global
Aquecimento global (Kg/CO <sub>2</sub> eq.)	204	7,89	0,17	-0,22	211,95
Categorias/ Fontes	Extração	Transporte	Processamento	Valor Global	
Aquecimento global (Kg/CO <sub>2</sub> eq.)	212,45	17,53	1,06	231,04	

### 3.3.2. ACIDIFICAÇÃO

A acidificação pode ser definida como a conversão da poluição do ar (principalmente dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), e óxidos de nitrogénio ( $\text{NO}_x$ )) em substâncias ácidas. Os dióxidos de enxofre são formados pela queima de combustíveis fósseis que contêm elevadas quantidades de enxofre e os óxidos de nitrogénio são produzidos por várias atividades industriais, estando presentes em gases de escape dos carros, por exemplo (Elvingson & Agren, 2004). Os compostos acidificantes estão presentes na atmosfera, sendo transportados essencialmente pelo vento, causando graves complicações na natureza e ao ser humano. As chuvas ácidas são um exemplo deste processo em que o dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogénio presentes na atmosfera de dissolvem na água da chuva, tornando-a ácida (Elvingson & Agren, 2004). A deposição ácida pode ocorrer como precipitação húmida (neve, chuva ou neblina), como no caso das chuvas ou como deposição seca, na forma de partículas de gases, ou pode ainda ser absorvida por plantas, lagos ou oceanos. A sensibilidade à deposição de ácidos no mundo está presente na Fig. 12.

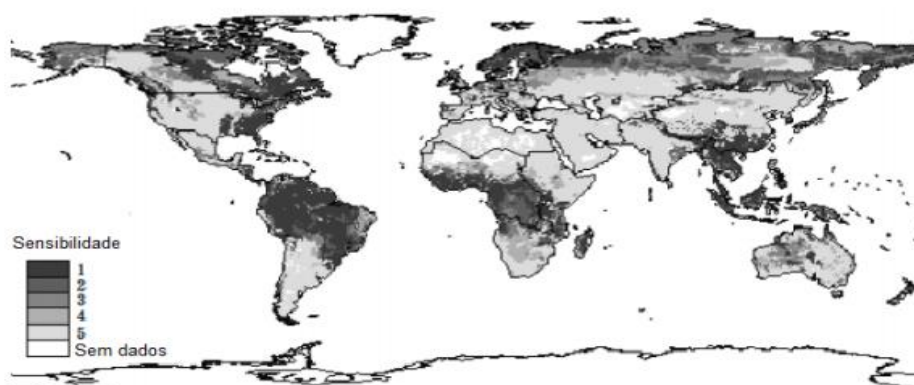


Fig.12: Sensibilidade à deposição de ácidos no mundo (Fonte: Elvingson & Agren, 2004).

Em resposta a este problema ambiental, é possível neutralizar a acidificação por alguns solos que contêm alcalinidade natural (giz ou cal), contudo este efeito é limitado. Assim, a acidificação ocorre quando a capacidade ou resistência destes solos em neutralizar os ácidos atmosféricos não é suficiente, podendo certos ecossistemas perder completamente a capacidade de neutralização, se as taxas de deposição ácida excederem os seus níveis de tolerância. Por outro lado, os oceanos têm a capacidade de absorver cerca de 25% do  $\text{CO}_2$  emitido para a atmosfera, conseguindo reduzir o impacto deste gás no efeito de estufa. Assim, a acidificação oceânica é originada quando o  $\text{CO}_2$  se dissolve na água dos oceanos, afetando significativamente determinados processos quer reprodutivos, quer fisiológicos, além de tornar a água do mar corrosiva (Duarte & Hendriks, 2010). Consequentemente, as substâncias ácidas podem atacar os materiais artificiais e naturais, causando danos nos valores naturais,

assim como na saúde humana. Por exemplo, o cimento e o calcário são muito sensíveis ao ácido, originado muitas vezes a desintegração da estrutura do material. Através da análise da Fig. 13, podemos verificar as tendências das emissões de poluentes de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  desde 1990.

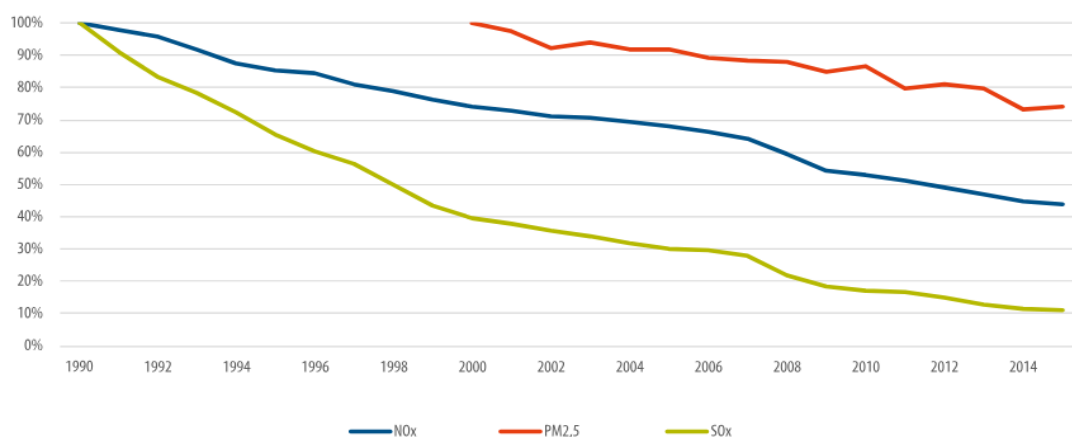


Fig. 13: Tendências das emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  desde 1990 (Fonte: AEA, 2018).

O valor-limite diário da UE para o  $\text{SO}_2$  tem-se registado mais de seis vezes superior ao valor indicado nas orientações da OMS. Embora quase todos os Estados-Membros respeitem o valor diário da UE (Fig. 14), a AEA sublinha que, em 2015, 20% da população urbana da UE ainda se encontrava exposta a concentrações acima dos valores previstos nas orientações da OMS (AEA, 2018).

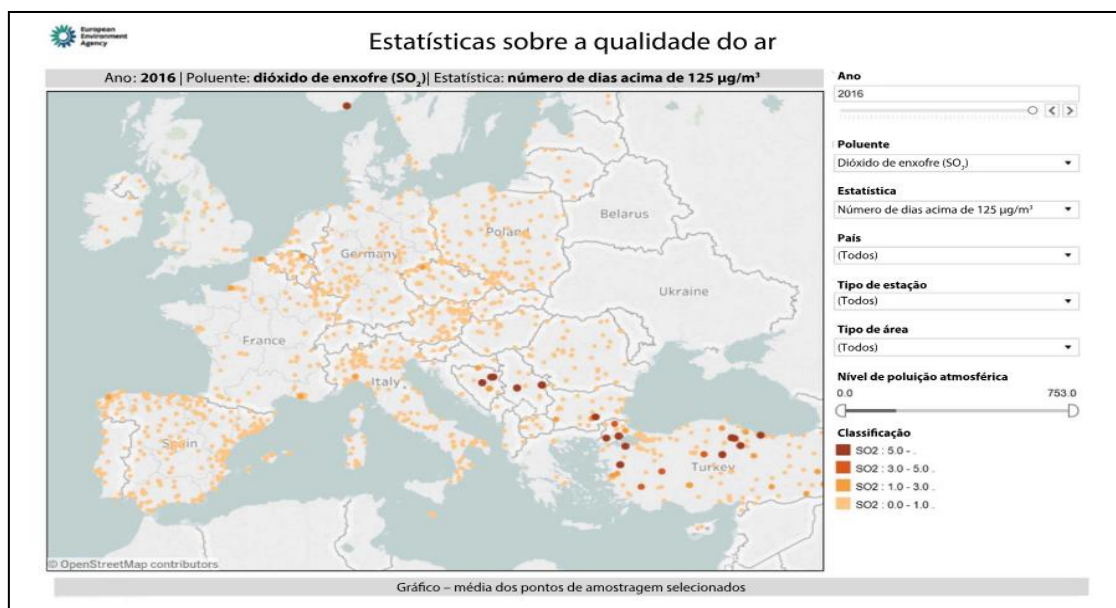


Fig. 14: Cumprimento do valor-limite diário de  $\text{SO}_2$  em 2016 (Fonte: AEA, 2018).

### 3.3.3 EUTROFIZAÇÃO

A eutrofização é também um problema ambiental, de grande preocupação especialmente nas zonas húmidas e representa o enriquecimento de nutrientes. Normalmente, os nutrientes são adicionados ao solo, através da fertilização do mesmo, por exemplo, com o objetivo de estimular o crescimento das plantas e produtos agrícolas. Contudo, esta deposição pode acarretar também a desorganização química dos ecossistemas, tanto em meio terrestre ou marinho, limitando a biodiversidade. Por exemplo, quando estes nutrientes são colocados em excesso, em áreas muito sensíveis, poderá ocorrer um crescimento exorbitante de plantas e algas que podem sufocar os outros organismos.

No meio aquático (lagos, rios, mares e oceanos), o enriquecimento de nutrientes leva a um crescimento das algas e conseqüentemente a um cada vez maior consumo de oxigénio e de água, originando vários impactes prejudiciais.

Felizmente, de acordo com AEA (2010), a eutrofização tem diminuído no continente europeu desde 1980.

As emissões da eutrofização são medidas em fosfato equivalente,  $PO_4$  eq. Como já foi abordado nesta dissertação, os níveis muito elevados de nutrientes como o fosfato em água (rios, lagos ou mares) levam à eutrofização.

A Tabela 3 apresenta os valores globais ambientais descritos nas declarações para a categoria da eutrofização, e em duas das fontes (Tabelas 3 e 4), os valores são detalhados, contendo informações adicionais sobre a extração, transporte, uso e processamento dos agregados.

Tabela 3: Valores globais encontrados nas declarações ambientais para a Eutrofização (Fonte: Bogliolo, 2006; BDZ, 1996; Turk Young, 2011).

Fontes/ Categoria	Eutrofização (Kg/ $PO_3$ - 4 eq.)
Bogliolo (2006)	0,09
BDZ (1996)	0,15
Turk Young (2011)	0,06

Tabela 4: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para a Eutrofização (Concretape, 2005; Buzzi Unicem, 2006).

<b>Categorias/ Fontes</b>	<b>Extração</b>	<b>Processamento</b>	<b>Uso</b>	<b>Fim de Vida</b>	<b>Valor Global</b>
Eutrofização (Kg/PO <sub>3</sub> - 4 eq.)	0,076	0,003	2,4e-6	-1,15e-4	0,079
<b>Categorias/ Fontes</b>	<b>Extração</b>	<b>Transporte</b>	<b>Processamento</b>		<b>Valor Global</b>
Eutrofização (Kg/PO <sub>3</sub> - 4 eq.)	0,07	0,02	0		0,09

#### 3.3.4. FORMAÇÃO DE OXIDANTES

A formação de oxidantes resulta da formação de compostos químicos, como o ozono, através da ação da luz ultravioleta em determinados poluentes do ar. Esta categoria é também referida de “smog de verão” ou “smog fotoquímico”, constituindo uma parte importante do smog de muitas cidades e áreas industriais. O ozono formado é um dos poluentes mais conhecidos e mais graves na Europa, já que os seus níveis elevados implicam graves problemas de saúde, além da redução da produtividade agrícola. Os óxidos de nitrogénio (NO<sub>x</sub>), o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (COVs) são emitidos para a atmosfera através de vários processos naturais e antropogénicos. Na atmosfera terrestre, sob a influência da luz ultravioleta, são formados oxidantes através da oxidação química de COV e CO na presença de NO<sub>x</sub>. Estas reações levam à formação de ozono (O<sub>3</sub>), nitrato de peroxiacetilo (NPA), nitrato de peroxibenzoila (NP) e uma série de outras substâncias (Wanner et al., 2001), que apresentam toxicidade elevada para os seres humanos, animais e plantas. Segundo AEA (2010), os dados mostram que mais de metade dos países da União Europeia não está a cumprir a sua meta relativamente às emissões de poluentes para o ozono, sendo que Portugal se encontra no grupo de países tiveram um maior aumento destas emissões ao longo do tempo. As emissões de oxidantes são medidas em gases etílicos equivalentes, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq.

Os valores globais ambientais descritos nas declarações para a categoria da formação de oxidantes em duas das fontes estão apresentados na Tabela 5, os valores são detalhados, contendo informações adicionais sobre a extração, transporte, uso e processamento dos agregados.

Tabela 5: Valores detalhados encontrados nas declarações ambientais para o aquecimento global (Concretope, 2005; Buzzi Unicem, 2006).

Categorias/ Fontes	Extração	Processamento	Uso	Fim de Vida	Valor Global
Formação de Oxidantes (Kg/C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.)	3,35 e-3	3,67e-4	6,25e-5	-1e-5	3,76e-3
Categorias/ Fontes	Extração	Transporte	Processamento	Valor Global	
Formação de Oxidantes (Kg/C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.)	0,04	0,02	0	0,06	

## **4. ARGAMASSAS**

Na era romana, a argamassa obteve bons resultados ao longo dos anos, tendo sido designada como “cimento romano”. Neste material empregava-se cal como elemento ligante. Em 1817, Louis Joseph Vicat, engenheiro francês, obteve o aval na invenção do cimento artificial, também conhecido como “ouro branco”, mais tarde substituído pelo Cimento Portland.

A utilização de argamassas, na forma tradicional, na parte sul portuguesa, é um dos indícios de que os muçulmanos estiveram habitados nessa região, pois a cal está predominante em grande parte das construções, tanto em rebocos de paredes, quanto nos assentamentos de tijolos. O cimento veio ao mercado para substituir parcialmente a utilização da cal, sendo que nos anos 50 e 60, no Alentejo, essa cultura se generalizou.

### **4.1 UTILIZAÇÃO DA ARGAMASSA**

Na atualidade, as argamassas são utilizadas para diversas finalidades na construção civil, tanto em assentamento de tijolos como nos revestimentos, nesse último, com uma vasta predominância. No caso de revestimentos, servem para proteger as paredes, bem como forma decorativa. É de grande importância obter-se uma resistência mecânica, seja na aderência ao suporte, bem como em sua tração. As argamassas de revestimento têm um papel fundamental no controlo da ocorrência de manifestações patológicas em fachadas exteriores (Oliveira, 2018).

Entretanto, a escolha da composição da argamassa definirá tais fatores, com materiais bem selecionados, dosagens adequadas e análise dos suportes onde serão aplicadas as argamassas. A argamassa de revestimento constitui, assim, um elemento de elevada importância ao nível da construção, possuindo a função de proteger e melhorar as condições tanto a nível de salubridade, habitabilidade e também a nível estético (Oliveira, 2018).

### **4.2. PROPRIEDADES DA ARGAMASSA**

As características das argamassas são avaliadas através de ensaios, pois tais características podem influenciar o comportamento das argamassas aplicadas. Para isso serão realizados, no estado fresco, ensaios de massa volúmica aparente, espalhamento e teor de ar, sendo que no estado endurecido, os provetes serão submetidos aos ensaios de resistência mecânica (tração por flexão e compressão),

velocidade de ultrassom para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, condutibilidade térmica, absorção de água por capilaridade e porosidade aberta. Os tijolos revestidos de argamassa, com 2 cm de espessura, serão submetidos ao ensaio de arrancamento por tração (pull-off).

Ao longo desta dissertação estão detalhados cada ensaio, acima citado, apresentando-se, também, os resultados obtidos.

#### **4.3. APLICAÇÃO DA ARGAMASSA**

Consoante a composição das argamassas, essas poderão ser vinculadas ao suporte que receberá o material, pois há a necessidade de se controlar a sua composição, através da relação água-ligante, da trabalhabilidade, da temperatura e da espessura da camada aplicada sobre o suporte. Qualquer erro na composição poderá influenciar negativamente a estrutura, tanto em termos mecânicos como físicos.

Assim, é preciso ter muito cuidado com a relação água-ligante a utilizar, utilizando o menor valor possível para obter a trabalhabilidade desejada. E em alguns casos, a utilização de adjuvantes é necessária.

Nos revestimentos de paredes, aplicam-se rebocos com diversas espessuras. Para além disso, existem várias camadas, sendo que as mais próximas do suporte são as mais resistentes. Nesse caso, a quantidade de ligantes na superfície mais externa é reduzida.

No método tradicional de rebocos de paredes é comum utilizar três camadas: o salpico, também denominada como chapisco, o qual possui quantidade de água e ligantes elevados, com função de criar aderência a alvenaria (Fig. 15); a base, camada espessa, regularizadora de toda a área de alvenaria que é aplicada em uma única camada ou mais e que, além de servir como impermeabilizante, serve para se manter uma certa aderência com a camada seguinte (Fig. 16); o esboço, que consiste em um tipo de acabamento fino, que tem como objetivo criar a beleza final (Fig. 17), e que possui uma composição com baixo teor de ligantes e com agregados finos abaixo de 250  $\mu\text{m}$ . Esta última camada deve ser bem tratada para se evitar possíveis fissuras.



Fig. 15: Chapisco em parede  
(Fonte: Portal do conhecimento, s.d.)



Fig. 16: aplicação da base  
(Fonte: Pedreirão, s.d.)



Fig. 17: Acabamento fino  
(Fonte: Pedreirão, s.d.)



É recomendado vários tipos de argamassas para revestimentos de edifícios antigos. Algumas soluções para tal enquadram-se nos seguintes tipos:

- Argamassas de cimento;
- Argamassas de cal hidráulica natural;
- Argamassas de cal aérea e cimento;
- Argamassas de cal aérea;
- Com pozolanas, pó de tijolo e outros aditivos minerais;
- Com “gordura”;
- Argamassas pré-doseadas.

De entre estas argamassas, há inconvenientes já conhecidos. As argamassas de cimento têm um aspeto final muito diferente das argamassas que se faziam antigamente, como, por exemplo, em relação à textura da superfície da parede e até mesmo em relação à reflexão da luz. As argamassas pré-doseadas possuem composições variadas, e, conseqüentemente, características e comportamentos diversos, as quais devem sempre ser avaliadas para cada situação. Sabe-se que não são apenas as características dos materiais envolvidos na argamassa que influenciam o seu desempenho. A durabilidade e a qualidade do revestimento (técnicas de produção e aplicação), bem como as condições de temperatura e humidade, o tempo de cura e o tratamento do suporte, são de extrema importância nos resultados.

## 5. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Como já foi referido nesta dissertação, a argamassa pode ser definida como uma mistura de ligante, água e areia. Em algumas situações, a argamassa pode também integrar outros materiais como cal, saibro, argila ou caulim, por exemplo. As funções destas misturas, na construção civil, contribuem na impermeabilização de superfícies, regularizar ou tapar buracos, eliminar ondulações, nivelar e aprumar paredes, pisos e tetos, podendo também ser utilizada em acabamentos quer em superfície lisa, áspera ou rugosa.

Atualmente, o interesse por argamassas com propriedades cada vez melhores é notório e por isso a inclusão de fibras sintéticas e vegetais tem sido um assunto de estudo. O sisal (Fig. 18) tem apresentado assim importância redobrada, uma vez que se trata de uma fibra vegetal produzida em grande dimensão no Nordeste brasileiro.



Fig. 18: Fibra de sisal  
Fonte: Manufatura do sisal, s.d.).

### 5.1. ORIGEM E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA SISAL

O sisal, *Agave sisalana perrine* (Amarilidaceae), é uma planta originária da península de Yucatã, no México, que é cultivada em condições climáticas semi-áridas. Em 1834, as primeiras plantas de sisal foram levadas para o sul da Flórida (EUA) e a partir de 1892 iniciou-se a sua produção em África. A introdução do sisal no Brasil ocorreu na Bahia em 1903.

O sisal está entre uma das fibras mais produzidas no mundo, correspondendo a aproximadamente 70% da produção comercial de todas as fibras vegetais. No Brasil, o cultivo de sisal, agaveicultura, centra-se na região Nordeste (Fig. 19), sendo os estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte os principais produtores, com 93,5, 3,5 e 3,0%,

respetivamente, da produção nacional (Mattoso et al, 1997).



Fig. 19: Mapa do Brasil onde é possível identificar os estados maiores produtores de sisal  
(Fonte: Uol, 2000).

O cultivo desta planta é realizado por pequenos produtores, predominando o trabalho familiar. O sisal é uma das espécies mais produzidas nestes estados, como podemos constatar pela análise da tabela 6.

Tabela 6: Principais produtos agrícolas ,produzidos nas regiões nordestina brasileira, produtoras de sisal em 2006

Município	Batata (ton)	Banana (ton)	Mandioca (ton)	Melancia (ton)	Feijão (ton)	Milho (ton)	Castanha de caju (ton)	Sisal (ton)
Araci	-	-	28220	-	1950	1.950	18	9360
Barrocas	42	-	2400	50	272	180	-	4000
Biritinga	42	-	840	-	782	750	120	-
Candeal	-	-	1620	-	25	59	-	29
Cansação	-	170	34.200	1200	4605	5460	4	4000
C. Coité	39	-	7.500	16	810	1350	-	13380
Ichu	-	-	1800	-	21	49	-	34
Itiuba	08	68	11400	120	2387	1010	4	5580
Lamarão	15	-	600	-	154	150	12	-
M. Santo	-	100	42000	-	2184	2880	3	4250
Nordestina	18	-	1260	5	120	75	-	2400
Queimadas	45	-	1750	42	240	150	-	4400
Quijingue	-	130	31200	300	16400	19200	100	3200
Retirolândia	14	-	1500	15	147	112	-	4160
Santaluz	51	-	1750	-	220	176	-	14830
S. Domingos	10	-	1500	-	95	75	-	4420
Serrinha	30	-	17760	-	1512	2500	52	32
Teofilândia	-	48700	18850	-	56	17	15	760
Tucano	-	110	31200	12000	10760	16200	520	280
Valente	30	-	2800	10	175	125	-	9900
Total	344	49278	240150	13758	42915	52.468	848	85015

(Fonte: IBGE, 2006)

A produção do sisal é um processo que engloba várias etapas desde o cultivo da planta até à industrialização da fibra, passando pelo desfibramento da mesma. Assim, o sisal, além de constituir uma fonte de renda e emprego para um grande número de trabalhadores, apresenta também relevante importância como agente de fixação do

homem à região semi-árida do nordeste brasileiro, sendo muitas vezes a única alternativa de cultivo que apresenta resultados económicos satisfatórios. Atualmente, o Brasil é sem sombra de dúvida o maior produtor e exportador mundial de fibras de sisal, sendo que 70% da exportação se destina aos mercados europeu e asiático.

## **5.2. MORFOLOGIA DA FIBRA DE SISAL**

O sisal, planta monocotiledônea, produz fibra dura e grossa, de cor creme ou amarelo pálido, de 1 a 1,5 m de comprimento, que abastece 70% do mercado mundial de fibras duras (Embrapa,2008).

As fibras, por sua vez, são constituídas por fibrilhas ou fibras elementares que têm de 1,5 a 4 mm de comprimento e 10 a 30  $\mu\text{m}$  de diâmetro, sendo que a espessura da parede celular varia de 6 a 9  $\mu\text{m}$ . Observou-se também que a parte mais resistente da fibra está localizada a cerca de 30 a 60 cm da sua base e a de menor resistência na região apical (90-120 cm).

Diversos autores realizaram estudos acerca da composição química da fibra de sisal, concluindo que a mesma é constituída por 65,8% de celulose, 12% de hemicelulose, 9,9% de lenhina e 0,8% de pectina. Por outro lado, Mwaikambo et al (2000) estudaram o índice de cristalinidade, chegando à conclusão que este deve rondar os 70,9%. As fibras apresentaram também boa estabilidade térmica até cerca de 250 °C, o que possibilita a sua utilização para processamento com a maioria dos polímeros na produção de compósitos.

## **5.3. APLICAÇÕES DA FIBRA DE SISAL**

Hoje em dia, o interesse pelas fibras naturais em detrimento das fibras sintéticas é cada vez mais evidente, quer para o reforço de plásticos, quer para a obtenção de materiais com desempenho mecânico e térmico adequados (Li et al, 2000). Esta preferência justifica-se pelo facto de as fibras naturais serem biodegradáveis, fontes renováveis, contribuindo para um desenvolvimento sustentável, além de apresentarem um custo reduzido. Por outro lado, a fibra de sisal danifica menos os equipamentos durante os métodos convencionais de processamento de polímeros, quando comparada com fibras inorgânicas.

A fibra de sisal pode ter diversas aplicações em inúmeros ramos. Além da construção civil, como já foi mencionado, pode também ser usada na indústria automóvel, fabrico de cordas, tapetes, sacos, vassouras, estofos, artesanato, móveis, madeiras, fabrico de pasta de celulose para produção do papel Kraft de alta resistência, e de outros tipos de papel fino, como para cigarros, filtros, fraldas, etc.

A fibra de sisal apresenta assim vantagens em relação a outras fibras naturais devido à sua elevada resistência às secas das regiões semi-áridas do Nordeste brasileiro e também devido ao seu baixo custo de produção.

#### 5.4. PROPRIEDADES FÍSICAS DA FIBRA DE SISAL

O funcionamento dos materiais compósitos está baseado na transferência de tensões entre a fibra de reforço e a matriz, o que justifica a ocorrência de grandes deformações antes da ruptura do elemento construtivo, mesmo após a fissuração da matriz, pois a aderência entre a fibra e a matriz permite o desenvolvimento de tensões cisalhantes na interface até se atingir o equilíbrio. Assim, nos materiais compósitos, as tensões solicitantes são resistidas por uma ação composta, onde parte da força é resistida tanto pela matriz como pelas fibras.

Como já foi referido, a transmissão de forças entre a fibra e a matriz deve-se à aderência que pode ser definida como uma tensão cisalhante na interface entre a fibra e a matriz envolvente. A aderência resulta da ação de vários componentes como a adesão físico-química entre a fibra e a matriz; uma componente mecânica de ancoragem e o atrito fibra-matriz. As características das fibras usadas, como o volume, geometria, tipo de material, orientação, condição superficial e da matriz, como a sua composição, propriedades físicas e mecânicas e condição de fissuração influenciarão os componentes mencionados.

A aderência por cisalhamento monitoriza a transferência de tensões paralelas ao eixo longitudinal da fibra. Assim, em matrizes fissuradas, as tensões de cisalhamento presentes resistem ao arrancamento da fibra, transferindo a carga para pontos da matriz ainda não fissurados. Primeiramente, a aderência por cisalhamento é constituída apenas pelo componente físico-químico de aderência.

Quando as deformações entre fibra e matriz são compatíveis e as tensões de cisalhamento são proporcionais às deformações, estamos perante uma aderência por cisalhamento elástica. Por outro lado, quando as tensões de cisalhamento aumentam devido a esforços ou deformações externas, a aderência físico-química tende a romper, gerando uma separação entre a fibra e a matriz. A partir desta tensão limite, denominada resistência ao cisalhamento, a componente principal da aderência de cisalhamento passa a ser o atrito, e a aderência de cisalhamento é categorizada como friccional. Os modelos que fornecem uma solução analítica para a simulação da interação fibra-matriz em matrizes fissuradas são baseados no arrancamento de fibra, como podemos constatar pela análise da Fig. 20.

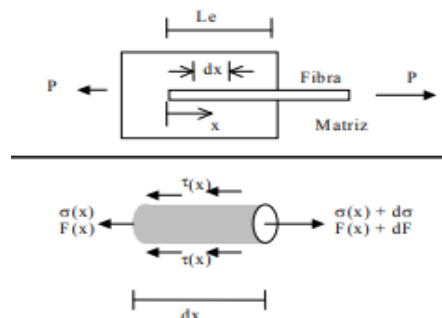


Fig. 20: Modelagem de arrancamento para simular a interação fibra-matriz

(Fonte: Bentur & Mindess, 1990).

Os compostos reforçados com fibra de sisal destacam-se por apresentarem alta resistência ao impacto, além de excelentes propriedades de resistência à compressão e à flexão (Li et al, 2000), o que se deve ao facto desta fibra apresentar um dos valores mais elevados em módulo de elasticidade e resistência mecânica, quando comparada com outras fibras naturais (Bledzki & Gassan, 1999).

Para clarificar as propriedades físicas da fibra de sisal apresenta-se na tabela 7 uma comparação entre esta fibra e as fibras de vidro, carbono e aço quanto à resistência à compressão e deformação na rutura (flexão).

Tabela 7: Propriedades das fibras de sisal e de algumas fibras minerais

Tipo de Fibras	Diâmetro (mm)	Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na rutura (%)
Sisal	-	-	13-26	0,28-0,57	3,00-5,00
Aço	5-50	7,84	190-210	0,50-2,00	0,50-3,50
Carbono	9	1,90	230	2,60	1,00
Vidro	9-15	2,60	70-80	2,00-4,00	2,00-3,50

(Fonte: Dias et al, 2010).

## 5.5. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão difere consoante o tipo de fibra usado. Para fibras de aço, por exemplo, Mangat e Azari (1984) e Fanella e Naana (1985), citados por Lima (1999), obtiveram uma redução até 10% da resistência à compressão, quando adicionado um volume de fibra correspondente a 0,5% do volume da argamassa. Por outro lado, Rodrigues (1999), citado por Lima (1999), concluiu que com a utilização de fibras de sisal, os rebocos apresentaram uma redução na resistência à compressão de 45%, quando adicionado um volume de 3% de fibras. A resistência à compressão dos rebocos varia consoante o tipo e o volume de fibras adicionados à argamassa. Assim, se a compactação for ineficiente, a porosidade da mistura aumentará, contribuindo para a redução da resistência.

Segundo Lima (1999), citando Toledo Filho, quando as fibras de sisal absorvem água, aumentam de dimensões radialmente cerca de 15% do seu diâmetro. Por esta razão, na produção de argamassas reforçadas com fibras naturais é importante ter em conta o tempo de cura das mesmas, pois é neste período que ocorre a perda da água absorvida anteriormente e, conseqüentemente, uma redução de volume das fibras. Esta redução aumentará ainda mais as descontinuidades no interior dos rebocos.

Conclui-se assim, quanto à resistência à compressão, que geralmente as fibras reduzem a capacidade resistente do reboco. Contudo, estas são importantes na medida em que evitam a fratura instantânea do corpo comprimido, dissipando e desviando os planos de rutura (Dias et al, 2010).

## **5.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO**

Para avaliar a capacidade de resistência à flexão das argamassas às quais foram adicionadas fibras de sisal foram elaborados diversos trabalhos experimentais. As principais conclusões obtidas nestes trabalhos revelam que ocorreu uma melhoria do comportamento dos rebocos sujeitos a ações de flexão, sendo que, quando sujeitos a esforços de compressão, os rebocos demonstraram menor resistência em relação às argamassas sem adição de fibras, como já foi referido acima (Dias et al, 2010).

Nos estudos laboratoriais desenvolvidos por Dias e colaboradores (2010), aos 14 e aos 28 dias de cura da argamassa, registaram-se aumentos da resistência à flexão na ordem dos 80% e 150% respetivamente, para um teor de fibras de 5% e 6% em função do peso de ligante. A diminuição da resistência à compressão, registada para esse teor, foi de 35% aos 14 dias e apenas 40% aos 28 dias. Contudo, neste tipo de argamassas, a importância da resistência à flexão é superior à da resistência à compressão, o que nos permite deduzir que a adição de fibras de sisal é altamente benéfica no que se refere às características dos rebocos, uma vez que permite a diminuição e dissipação da sua fissuração, além de melhorar o seu comportamento na rutura quando sujeitos a esforços excessivos provenientes da alvenaria.

Tendo em conta o comportamento dos rebocos, quando sujeitos a esforços de flexão e compressão, a adição de um teor de fibras de 5% é a ideal, considerando a capacidade resistente do mesmo. Adicionando a percentagem de fibras mencionada, o reboco irá exibir um incremento na resistência à flexão na ordem dos 120% comparativamente ao reboco sem fibras (Dias et al, 2010). Por outro lado, para este teor registaram-se reduções na resistência à compressão de menos de 40%, com um valor de 4,9 MPa. No entanto, este valor não é problemático, pois situa-se acima do valor mínimo exigido pela norma EN 998-1 (0,4 MPa), aplicável às argamassas de rebocos de paredes.

Se pensarmos na rutura das argamassas reforçadas com fibra de sisal, podemos concluir que são ligeiramente reforçadas e adquirem uma fratura mais dúctil no momento do colapso. Assim, a utilização das fibras como reforço de argamassas revela-se uma alternativa bastante viável, pois permite uma melhoria nas propriedades do reboco, resultando num significativo incremento de desempenho dos rebocos (Dias et al, 2010).

## **5.7. UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

A incorporação de fibras naturais como agente de reforço nas matrizes cimentícias tem sido amplamente estudada. Os principais estudos acerca desta temática foram desenvolvidos pelo estado brasileiro, o que se deve à abundância do cultivo de sisal no Brasil (Dias et al, 2010). As conclusões gerais dos diversos estudos realizados indicam que as fibras naturais, como o sisal, permitem aumento da resistência mecânica, uma vez que funcionam como ponte de ligação entre as partículas, evitando o colapso do sistema. Os resultados apresentados nestes estudos mostraram também vantagens em termos de comportamento térmico, absorção de água e resistência (Picanço & Gavami,

2008). Assim, o uso de fibras nas argamassas beneficia o comportamento pós-fissuração do reboco e funciona como ponte de transferência de tensões. Desta forma, uma argamassa que poderia apresentar uma fratura frágil pode vir a exibir uma fratura quase dúctil (Veiga, 1998).

Eires et al (2014) realizaram um estudo acerca da incorporação de fibras naturais em argamassas de terra e cal. Estes autores concluíram que a incorporação de fibras naturais poderá ser uma opção viável para resolver o principal problema das argamassas à base de terra, a fendilhação/fissuração por retração. Os resultados apresentados neste estudo mostraram que as propriedades das argamassas no estado seco (resistência mecânica e absorção de água) não foram afetadas, o que demonstra a minimização desta problemática. Por outro lado, a incorporação das fibras nas argamassas contribuiu para um aumento da durabilidade destas, pois a resistência mecânica, absorção, secagem e compressão foram beneficiadas. Estes resultados foram também confirmados por outros autores, evidenciando a importância deste material na construção. Estes autores observaram ainda que a adição numa argamassa de 1,5% em volume de fibra de sisal contribuiu para uma redução dos valores de absorção de água, facilitando o fechamento dos poros e, conseqüentemente, melhorando a compactação.

A utilização da fibra de sisal na construção de instalações destinadas à produção animal tem tido cada vez mais relevância, pois nestes casos além de ser recomendável que os materiais usados apresentem resistência, durabilidade e custo reduzido, é também indispensável que apresentem uma baixa condutibilidade térmica, de forma a garantir o conforto térmico das instalações (Toledo Filho et al, 2015). A utilização da fibra de sisal na cobertura das instalações é assim valorizada por possuir uma boa capacidade de isolamento térmico (Baêta & Souza, 1997). Acredita-se que a elevada capacidade de isolamento térmico apresentada pelo material em apreço contribuirá significativamente para o conforto térmico das instalações rurais e, conseqüentemente, para o incremento da produtividade animal (Toledo Filho et al, 2015).



## **6. DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL E DOS MÉTODOS DE ENSAIO**

Na presente dissertação foram analisados nove tipos de argamassas, cada uma com traço de 1:3 (1 de ligante: 3 de areia) em volume, nomeadamente:

- Argamassa com 100% de ANF;
- Argamassa com 100% de ANF + 1% de Fibra de Sisal (FS);
- Argamassa com 100% de ANF + 2% de Fibra de Sisal (FS);
- Argamassa com 50% de ARF + 50% de ANF;
- Argamassa com 50% de ARF + 50% de ANF + 1% de Fibra de Sisal (FS);
- Argamassa com 50% de ARF + 50% de ANF + 2 % de Fibra de Sisal (FS);
- Argamassa com 100% de ARF;
- Argamassa com 100% de ARF + 1% Fibra de Sisal (FS);
- Argamassa com 100% de ARF + 2% de Fibra de Sisal (FS).

Apresentam-se de seguida os ensaios realizados para a caracterização, no estado fresco e endurecido, das formulações de argamassa estudadas.

Para a caracterização no estado fresco procedeu-se à avaliação da:

- Massa Volúmica Aparente;
- Consistência por Espalhamento;
- Teor de Ar.

Enquanto que para a caracterização no estado endurecido procedeu-se aos seguintes ensaios:

- Tração por flexão;
- Compressão;
- Ultrassons (Módulo de elasticidade dinâmica);
- Arrancamento por tração;
- Massa volúmica aparente e específica;
- Condutibilidade térmica;
- Absorção de água por capilaridade;
- Porosidade Aberta.

## 6.1. COMPOSIÇÕES ESTUDADAS

Considerou-se um traço de 1:3 em volume, sendo 1 de ligante para 3 de areia (reciclado ou natural). A quantidade de água foi determinada de forma a garantir a obtenção de uma consistência constante de aproximadamente 70%. A granulometria dos agregados reciclados finos (ARF) foi equalizada com a granulometria dos agregados naturais finos, o que implica que os gráficos granulométricos sejam iguais. A relação água-ligante foi limitada a 0,8, o que implicou a necessidade de utilização de adjuvante para a estabilização.

## 6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Antes da realização dos ensaios de avaliação das características das argamassas, procedeu-se à caracterização dos materiais constituintes, em particular no que se refere aos agregados. A caracterização dos ligantes considerada corresponde à apresentada na ficha técnica dos produtos, com exceção da que se refere à baridade dos ligantes.

### 6.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL

A caracterização do Sisal, baseada em ensaios efetuados por Martin et al. (2009), encontra-se presente na Tabela 8.

Tabela 8: Caracterização da fibra de sisal

Parte	Posição na fibra	Resist. Tração	Alongamento (%)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
1	0-30	448 $\pm$ 113	5 $\pm$ 1	465 $\pm$ 20
2	30-60	671 $\pm$ 274	3 $\pm$ 1	430 $\pm$ 9
3	60-90	565 $\pm$ 146	3 $\pm$ 1	440 $\pm$ 20
4	90-120	369 $\pm$ 129	2 $\pm$ 1	143 $\pm$ 14

(Fonte: Martin et al., 2009)

Em função dos resultados obtidos na caracterização da fibra de sisal, na produção das argamassas optou-se por utilizar as partes 2 e 3 da fibra, para que sejam aproveitadas as maiores resistências possíveis (Fig. 21).



Fig. 21: Parte utilizada da fibra de sisal na produção das argamassas

Para a produção das argamassas, as fibras foram cortadas em aproximadamente 3 cm de comprimento (Fig. 22), tendo sido colocadas na amassadura, desidratadas e de forma gradativa.



Fig. 22: Sisal cortado e pesado

#### 6.2.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS NATURAIS

A areia natural tem origem na freguesia de Pinhal do Conde da Cunha, Concelho de Amora, Setúbal.

Este ensaio foi realizado com o objetivo de determinar as características granulométricas das areias utilizadas na produção das argamassas. Os ensaios efetuados basearam-se no disposto na norma NP 933-1(2000) e NP 933-2 (1999).

Foi realizado a análise granulométrica do agregado natural fino como referência. Foram utilizados um total de 9300 g de areia natural, misturada na proporção de 1/3 de areia grossa e 2/3 de areia fina (Fig. 23). A seguir, foi retirado dessa mistura 226.9 g para análise granulométrica. A partir dessa análise efetuada foi produzido todo o agregado reciclado fino (ARF) provenientes de RCD, tendo como referência a granulometria do agregado natural.



Fig. 23: Mistura das areias grossa e fina

Os utensílios utilizados (Fig. 24) nesse processo, foram os seguintes:

- Peneiros de rede de malha quadrada com as seguintes aberturas nominais: 4,0mm, 2,0mm, 1,0mm, 500 $\mu$ m, 250  $\mu$ m, 125  $\mu$ m e 63  $\mu$ m;
- Balança;
- Estufa para secagem a 105°C – 110°C;
- Agitador de peneiros;
- Peneiros com menores diâmetros, para peneiração manual, por garantir a qualidade do agregado.



Fig. 24: Equipamentos utilizados na análise granulométrica

Em relação aos procedimentos de ensaio, primeiramente, procedeu-se à peneiração da amostra, começando pelo peneiro de maior abertura (Fig. 25). A peneiração realizou-se de forma a garantir que os peneiros efetuavam movimentos oscilatórios de translação e de rotação acompanhados de vibração, de modo a manter o material em movimento contínuo no fundo dos peneiros. Não se deve forçar à mão ou com qualquer outro instrumento a passagem de partículas através dos peneiros. Pode-se, no entanto, desobstruir as malhas dos peneiros nas quais tenham encravado partículas, utilizando uma escova de pelo macio na face inferior do peneiro. Deve concluir-se a peneiração quando, durante 1 minuto, não passar mais de 1% do material retido nesse peneiro. Efetua-se o registo do material retido em cada um dos peneiros. Soma-se o material retido em cada peneiro com o material que passou através do peneiro de menor abertura. Caso a perda de material registada durante o ensaio tenha sido superior a 5% da massa inicial do provete deve repetir-se o ensaio.



Fig. 25: Peneiros com os agregados retidos

A percentagem do agregado retido em cada peneiro e o módulo de finura são calculadas utilizando as seguintes fórmulas:

$$\%Agregado = \frac{m1}{m2} \times 100$$

Onde:

M1 – Massa do provete seco

M2 – Massa do material retido num determinado peneiro

$$Mf = \frac{\sum Rar}{100}$$

Onde:

Mf – Módulo de finura

Rar – Resíduo acumulado retido

### 6.2.3. PRODUÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Para se obter o material reciclado necessário para a produção, procedeu-se a trituração do RCD, obtidos numa demolição situada na freguesia do Lavradio, Concelho do Barreiro, Setúbal, apresentado na Figura 26, através de uma trituradora giratória com esferas de chumbo. A seguir foi efetuado o peneiramento de todo o material produzido, tendo como referência a granulometria dos agregados naturais. O processo de obtenção dos agregados finos reciclados (ARF) está representado nas Figura 27.





Fig. 26: Resíduos de construção e demolição obtidos na freguesia do Lavradio, Portugal



Fig. 27: Processo de moagem do RCD

A partir dos valores obtidos da granulometria dos agregados naturais, procedeu-se à produção dos agregados reciclados. A granulometria de referência foi seguida. Obteve-se, assim, a quantidade de material reciclado em função de cada abertura dos peneiros (Fig. 28).

Após obter a quantidade de agregados finos reciclados necessária (de acordo com a proporção calculada) para a produção das argamassas, misturaram-se as diferentes granulometrias dos agregados reciclados de modo a que, na sua totalidade, se obtivesse uma granulometria idêntica à dos agregados naturais (Fig. 29).



Fig. 28: Agregados reciclados produzidos conforme curva granulométrica dos ANF



Fig. 29: Produto final da produção dos agregados reciclados

#### 6.2.4. BARIDADE DOS AGREGADOS

A determinação da baridade foi efetuada de acordo com o estabelecido na EN 1097-3 (2002), sem compactação. Este ensaio teve como finalidade a determinação da massa de agregado seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida. É com base no resultado deste ensaio que se transforma o traço volumétrico de uma argamassa no traço em massa. A utilização de um traço em massa é mais conveniente em termos laboratoriais, uma vez que permite uma dosagem mais exata. Nesse sentido, foi utilizado para tal procedimento os seguintes materiais (Fig. 30):

- Balança;
- Funil;
- Régua niveladora;
- Recipiente de aço, cilíndrico, torneado interiormente, estanque à água, suficientemente rígido para manter a forma mesmo em condições severas de

utilização, e munido de asas. Para uma dimensão máxima do agregado inferior a 12,5mm o recipiente deve ter uma capacidade de 3dm<sup>3</sup>.



Fig. 30: Utensílios utilizados para a obtenção da baridade

Para os procedimentos de ensaio, colocou-se o recipiente de volume conhecido bem assente na bancada, de forma a não oscilar. De seguida, lançou-se o agregado em pequenas porções para dentro do recipiente através de um funil, distribuindo-o em camadas horizontais, até preencher toda a capacidade deste. O nivelamento da superfície do material pelo plano da boca do recipiente foi efetuado com uma régua. Pesou-se o recipiente cheio (Fig. 31).



Fig. 31: Baridade

#### 6.2.5. CIMENTO

A caracterização do cimento efetuada no âmbito do trabalho experimental do presente estudo consistiu na determinação da baridade no valor de 1200kg/m<sup>3</sup>, tendo-se tomado como base as restantes características indicadas nas fichas técnicas dos dois ligantes utilizados. O procedimento de ensaio é idêntico ao descrito para os agregados. Na tabela 9 apresentam-se as características do cimento Portland de calcário – CEM II/B-L 32,5N presentes na sua ficha técnica.



Tabela 9: Características químicas, físicas e mecânicas do cimento [segundo ficha técnica].

Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado
Teor de Sulfatos (em SO <sub>3</sub> )		NP EN 196-2	≤ 3,5%
Teor de Cloretos		NP EN 196-21	≤ 0,10%
Resistência aos primeiros dias		Resistência de Referência (MPa)	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
-	≥ 16	≥ 32,5 e ≤ 52,5	
Propriedades		Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa		NP EN 196-3	≥ 75 min
Expansibilidade		NP EN 196-3	≤ 10 mm

Este cimento é composto por 65% a 79% de clínquer Portland, 21% a 35% de calcário e 0% a 5% de outros constituintes [NP EN 197-1].

### 6.3. PLANO DE ENSAIO

O plano de ensaios presente neste trabalho tem como objetivo a avaliação das características das argamassas através da utilização de técnicas laboratoriais “in situ”. Tendo igualmente o objetivo de as correlacionar, de forma a se retirar uma conclusão relativamente às características da argamassa, sem necessariamente destruir as amostras, nomeadamente nos ensaios não destrutivos.

A ordem dos ensaios foi fundamental para o melhor aproveitamento dos provetes, pois, além de não ter havido perdas de materiais, a produção de provetes foi também reduzida (Fig. 32).

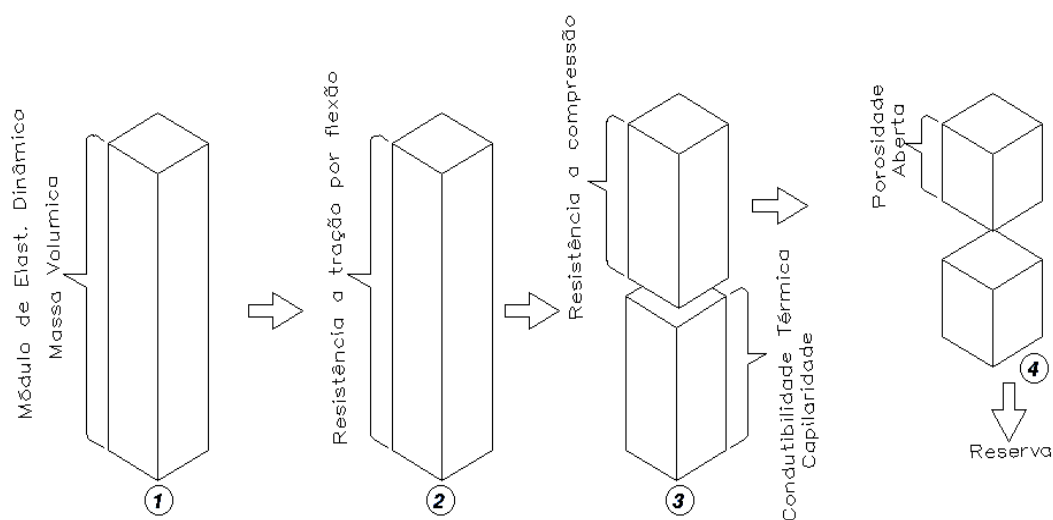


Fig. 32: Sequências dos ensaios

#### 6.4. PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A produção da argamassa e dos provetes são etapas importantes para as características das argamassas, sendo nomeadamente necessário que estas etapas sejam sempre realizadas em igualdade de condições, de modo a evitar variabilidades de características nas argamassas. Para a realização das produções das argamassas foram utilizados os seguintes materiais (Figuras 33,34 e 35):

- Misturadora mecânica, composta pelo motor e pelo balde;
- Raspadeira;
- Recipientes para pesar os agregados, os ligantes e a água.



Fig. 33: Misturador mecânico



Fig. 34: Recipientes com os materiais para a produção



Fig. 35: Recipiente com Adjuvante

#### 6.4.1. PROCESSO DE AMASSADURA

Antes mesmo de efetuar as amassaduras, foi necessário, com o objetivo de não se perder tempo durante o processo, proceder previamente à pesagem de todos os constituintes (Fig. 36).



Fig. 36: Materiais para a produção das amassaduras

Para a produção da argamassa deve introduziu-se previamente a água na misturadora e, logo a seguir, o cimento. Põe-se a misturadora a funcionar, num movimento lento ( $140 \pm 5$  rpm). Após o período de 30 segundos, e durante mais um período de 30 segundos, coloca-se a areia na misturadora. Logo de seguida, coloca-se a misturadora em movimento rápido ( $285 \pm 5$  rpm), desligando-a ao fim de 30 segundos. Com o auxílio de uma raspadeira e durante 15 segundos, raspa-se o interior do balde, deixando repousar a mistura durante 75 segundos. Ao fim, liga-se a máquina em movimento rápido durante 1 minuto e a amassadura é finalizada (Fig. 37).



Fig. 37: Processo de amassadura.

## **6.5. ENSAIOS EFETUADOS NO ESTADO FRESCO**

### **6.5.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO**

O ensaio da mesa de espalhamento, foi realizado com base na EN1015-3 (1999), com o objetivo de se determinar a consistência da argamassa produzida no estado fresco, durante o período de repouso, a fim de mensurar a fluidez da argamassa fresca. A partir deste ensaio é possível prever o período em que uma determinada argamassa mantém a sua trabalhabilidade, com uma consistência viável para ser aplicada na obra após o momento da sua amassadura. Neste ensaio os materiais utilizados foram os seguintes (Fig. 38):

- Mesa de espalhamento;
- Molde para a argamassa;
- Varão compactador;
- Paquímetro;
- Tabuleiro;
- Espátula;
- Pano molhado;
- Colher de pedreiro.



Fig. 38: Utensílios para o ensaio de espalhamento

Os procedimentos de ensaio estão descritos abaixo e representado na Fig. 39.

- Limpeza do molde e da mesa de espalhamento, de preferência mantendo húmidos;
- Colocação do molde no centro da mesa de espalhamento, ligeiramente humedecida;
- Introdução da argamassa até metade da altura do molde;
- Compactação através de 15 pancadas com a barra de compactação (atingindo a parte superior da argamassa);
- Introdução da argamassa até exceder a totalidade do molde;
- Compactação através de 15 pancadas com a barra de compactação (atingindo a argamassa em toda a sua profundidade);
- Extração do excesso de argamassa com a espátula;
- Limpeza do exterior do molde e da mesa de espalhamento com pano molhado, a fim de evitar desperdícios de argamassa que poderão comprometer o ensaio;
- Retirar o molde de forma lenta e na vertical a permitir que a argamassa deslize pelo molde;
- Gira-se a manivela da mesa de espalhamento de modo a se aplicar 15 pancadas durante 15 segundos;
- Faz-se a medição do diâmetro de espalhamento em três direções com o paquímetro digital, utilizando as marcações assinaladas na mesa de espalhamento.



Fig. 39: Ensaio de espalhamento.



Para se obter o resultado da consistência por espalhamento, para cada amassadura, determinou-se a média dos resultados obtidos nas três direções registadas, apresentando-se esse valor em “mm”. O resultado do ensaio de espalhamento é apresentado em percentagem, sendo determinado através da expressão:

$$\text{Espalhamento [mm]} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} - 100 \times 100$$

Com d1, d2 e d3 em [mm].

### 6.5.3. TEOR DE AR

A quantidade de ar contido numa determinada argamassa influencia o seu desempenho. O facto é que, quanto menor o teor de ar incorporado na argamassa, mais compacta será a mesma e, conseqüentemente, maior será a massa volúmica aparente, assim como a sua resistência mecânica e módulo de elasticidade. A determinação do teor de ar seguiu a norma EN 1015-7 (1999) e os utensílios utilizados no processo estão descritos abaixo (Fig. 40).

- Recipiente para análise do teor de ar;
- Colher de pedreiro;
- Pilão de compactação;
- Régua metálica;
- Pipeta.

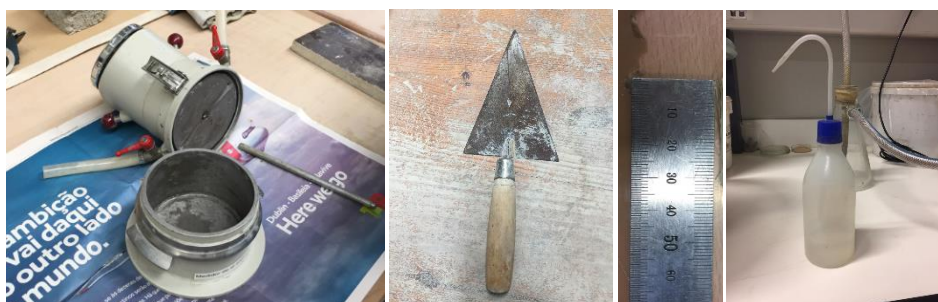


Fig. 40: Utensílios para o ensaio do teor de ar

Os ensaios, por sua vez, procederam-se da seguinte forma: colocou-se a argamassa através de uma colher de pedreiro no recipiente quatro em camadas com alturas próximas. Cada camada foi compactada manualmente com um pilão, aplicando-se 10 pancadas em cada uma delas. Com uma régua metálica foi retirado o excesso de argamassa para que a superfície ficasse plana. Foi encaixado a parte superior do aparelho de medição ao recipiente, fechou-se a válvula principal do aparelho e foi aberto as válvulas laterais, foi introduzido água numa delas com o auxílio de uma pipeta até sair água pela válvula do lado oposto. A seguir, bombeou-se ar até o ponteiro atingir o valor zero, abriu-se a válvula principal de forma lenta até que o ponteiro estabilizasse, e

assim obteve-se o teor de ar, em percentagem, na argamassa (Fig. 41).



Fig. 41: Ensaio do Teor de Ar

#### 6.5.4. MASSA VOLÚMICA APARENTE

A determinação da massa volúmica aparente das composições realizadas nesta dissertação segue a norma EN 1015-6 (1999), sendo realizada com recurso a um recipiente com volume ( $V$ ) e massas conhecidos ( $m_1$  e  $m_2$ ). Os utensílios utilizados no processo foram os seguintes (Fig. 42):

- Balança;
- Recipiente;
- Colher de pedreiro;
- Pilão de compactação;
- Régua metálica.



Fig. 42: Utensílios para a determinação da massa volúmica aparente.

Os procedimentos de ensaios seguidos rigorosamente envolvem os seguintes passos (Fig. 43):

- Pesagem do recipiente ( $m_1$ );
- Colocação da argamassa no recipiente com auxílio de uma colher de pedreiro;
- Pesagem do recipiente com a argamassa ( $m_2$ ).

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$\rho$  – massa volúmica aparente (Kg/m<sup>3</sup>);

$V$  – volume do recipiente (m<sup>3</sup>);

$m_1$  – massa do recipiente sem argamassa (Kg);

$m_2$  – massa do recipiente com argamassa (Kg).



Fig. 43: Massa Volúmica

#### 6.5.5 MOLDAGEM DOS PROVETES

A preparação dos provetes consistiu na sua moldagem em moldes de aço que permitem a preparação simultânea de 3 provetes prismáticos com dimensões de 40x40x160 [mm].

A desmoldagem foi efetuada ao fim de 24 horas, em todas as argamassas estudadas.

Com o objetivo de normalizar as curas, todos os provetes foram sujeitos às mesmas condições, sendo condicionados a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $60 \pm 5$  %. Todos os agregados utilizados nas amassaduras para a produção dos provetes foram previamente secos em estufa, de forma a ser possível reduzir a influência da humidade dos agregados. Os materiais utilizados para a produção foram (Fig. 44):

- Moldes com as dimensões 160x40x40 [mm];
- Compactador;
- Colher de pedreiro.



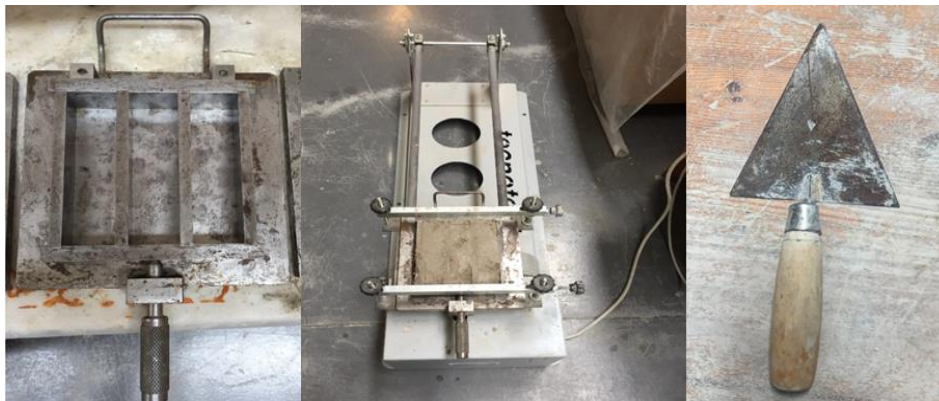


Fig. 44: Utensílios utilizados nas moldagens.

No processo de moldagem seguiu-se os seguintes passos (Fig. 45):

- Colocação do molde sobre o compactador;
- Fixação do molde ao compactador;
- Colocação da argamassa no molde;
- Vibrar com 60 pancadas;
- Retirada do molde do vibrador;
- Rasar o excesso de argamassa;
- Aguardar 24hs para a desmoldagem.



Fig. 45: Provetes moldados em prismas [40 mm x40 mm x160 mm]

#### 6.5.6. PROVETES DE ARGAMASSA SOBRE TIJOLOS

Com o objetivo de garantir a aplicação de igual espessura (2cm) em todos os tijolos revestidos e condições de aplicação das argamassas similares, construiu-se um suporte que garantisse tais condições. Aos tijolos de 30x20x14 [cm], foram aplicados revestimentos com as diversas argamassas, tendo-se posteriormente realizado o ensaio de arrancamento após 28 dias de idade.

Os materiais utilizados para a reboco dos tijolos estão descritos abaixo (Fig. 46).

- Molde para garantir a espessura da argamassa aplicada no tijolo;
- Balde com água para humedecer o tijolo antes da aplicação da argamassa;
- Colher de pedreiro;
- Talocha;
- Tijolos de 30x20x14 [cm].



Fig. 46: Materiais utilizados para revestir os tijolos com as argamassa.

A aplicação das argamassas no tijolo procedeu-se da seguinte maneira: primeiramente, os tijolos ficaram imersos em água a fim de evitar a absorção de água da argamassa por parte do tijolo. Foi utilizado caixas plásticas com água, onde os tijolos ficaram imersos por aproximadamente 2h. Depois de retirado o tijolo e da secagem da sua água superficial, colocou-se o molde e, logo a seguir, a argamassa com o auxílio de uma colher a uma altura de  $\pm 35$ cm em relação ao tijolo, com o objetivo de se manter a mesma energia de impacto a todos os tijolos. Aplicou-se, com uma colher de pedreiro, a argamassa com muita pressão contra o tijolo, para garantir a adequada adesão. Por fim, deu-se um acabamento à superfície utilizando-se uma talocha (Fig. 47). O tempo de desmoldagem utilizado foi o mesmo da preparação dos provetes prismáticos, ou seja, 24 horas. Após este período retirou-se o molde e colocou-se o tijolo na câmara condicionada.



Fig. 47: Moldagem dos tijolos

## 6.6. ENSAIOS EFETUADOS NO ESTADO ENDURECIDO

### 6.6.1. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

#### 6.6.1.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR FLEXÃO

Este ensaio tem como objetivo a determinação da resistência à flexão das argamassas, os quais foram efetuados de acordo com a norma EN 1015-11 (1999). A determinação da resistência à flexão através da aplicação de uma carga ( $F_f$ ) a meio vão do provete é um dos princípios da investigação, utilizando os roletes colocados nas partes superior e inferior. Toma-se nota da carga suportada pelo provete até à sua rutura e calcula-se a sua resistência à flexão. Para este ensaio, foi utilizado uma máquina para registro da força máxima para resistência à tração por flexão (Fig. 48).



Fig. 48: Máquina para o ensaio de tração por flexão

Em relação aos procedimentos de ensaio, primeiramente, coloca-se o provete na máquina, de modo a que este fique centrado e com o eixo longitudinal perpendicular aos dois apoios, garantindo que uma das faces laterais de moldagem fica assente nestes apoios.

Seguidamente, coloca-se o rolete superior da máquina, de forma a estabelecer contacto com a face superior do provete e aplica-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo e sem choques, até à rutura do provete (Figuras 49 e 50). Por fim, regista-se a força de rutura. A resistência à flexão é dada pela seguinte equação:

$$F_{fc} = \frac{1,5 \times F_f \times L}{d_1^2 \times d_2^2}$$

Onde:

$F_{fc}$  - Resistência a flexão, em MPa;

Ff - Carga máxima aplicada de flexão, em N;

L - Distância entre os roletes inferiores de apoio, em mm;

d1 e d2 – Dimensões laterais do provete, em mm.

$$F_{fc} = \frac{1,5 \times F_f \times 100}{40^2 \times 40^2} = 0.00234 F_f$$

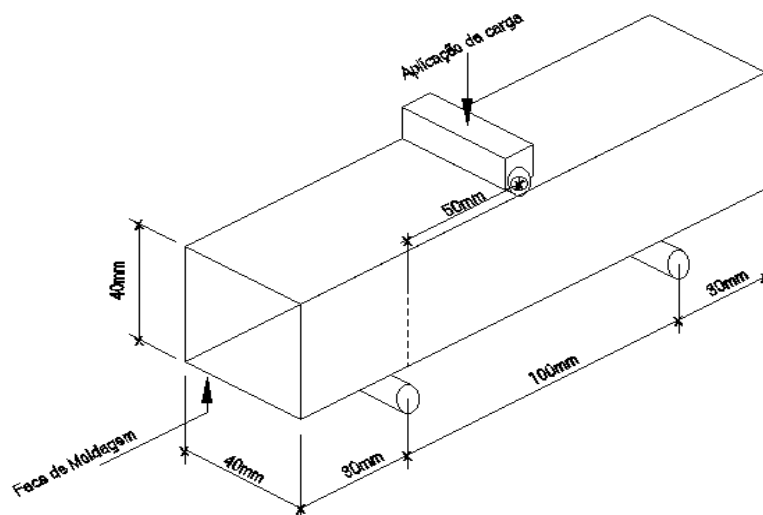


Fig. 49: Esquema de ensaio de resistência à flexão



Fig. 50: Provetes após o ensaio

#### 6.6.1.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O objetivo deste ensaio é a determinação da resistência à compressão de provetes de argamassa no estado endurecido, de acordo a norma EN 1015-11 (1999).

Após o ensaio de flexão, os meios prismas resultantes da flexão, foram submetidos à compressão, onde foram ensaiados até à rotura, através de uma máquina de ensaio de compressão, obtendo-se a carga máxima suportada pelo provete. Para este ensaio foi utilizada a prensa presente na Fig. 51.



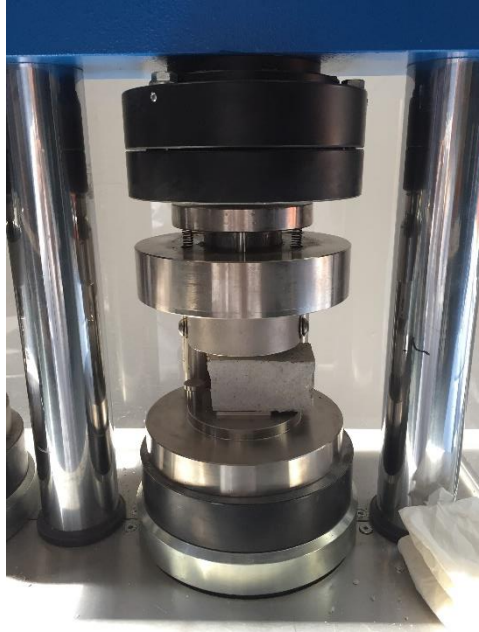


Fig. 51: Prensa para ensaios de compressão

Os procedimentos de ensaios seguiram-se da seguinte forma: colocou-se o provete no prato, na parte inferior da máquina, deixando em contacto uma das faces laterais da moldagem e deixando o provete bem no centro. Fez-se com que o prato superior da máquina descesse até estabelecer contacto com a face superior do provete. Aplicou-se uma força de forma crescente e gradual e em forma contínua, sem impactos, até atingir a rutura do provete. Anotou-se a força de rutura.

A resistência à compressão do provete é dada pela equação:

$$f_c = \frac{F_c}{A}$$

Onde:

$f_c$  a tensão de rutura à compressão;

$F_c$  a carga aplicada na rutura à compressão, em Newtons (N);

$A$  a área da zona comprimida, ou seja,  $40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$ .

Para as dimensões dos provetes ensaiados, o valor de tensão de rotura à compressão é dado por:

$$f_c = 6.25 \times 10^{-4} \times F_c$$

#### 6.6.2. ENSAIO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO (PULL-OFF)

O ensaio de arrancamento, com base na EN 1015-12 (2000), consiste no ensaio de aderência por tração direta, sendo também designado de “pull-off”. A força é transmitida por tração através de uma peça metálica redonda ou quadrada, que é colada inicialmente ao provete. O aumento gradual da força pode ser notado no equipamento até ser obtida a força de arrancamento. Logo após o arrancamento efetua-se uma análise visual da superfície de rutura, que pode ocorrer de 4 formas:

1. Na ligação entre o tijolo e a argamassa, se esta ligação for a mais fraca;
2. Na argamassa, se a ligação entre esta e o tijolo e o próprio tijolo for mais forte que a ligação intermolecular da argamassa;
3. No tijolo, se a ligação entre esse e a argamassa e a própria argamassa for mais forte que a ligação intermolecular do tijolo;
4. Na ligação da peça metálica à argamassa, sendo, neste caso, considerado o ensaio como não válido.

Neste ensaio foram utilizados os seguintes materiais (Fig. 52):

- Pastilhas metálicas quadradas;
- Equipamento para tracionar as pastilhas;
- Cola epóxi;
- Serra circular;
- Trincha para remoção de resíduos.



Fig. 52: Utensílios para ensaio de arrancamento

Em relação aos procedimentos de ensaios, estes iniciam-se pela realização de entalhes, de aproximadamente 3 mm, através de uma serra circular, a fim de, posteriormente, colar as pastilhas metálicas ao tijolo. Para efetuar tais entalhes, é necessária a marcação de uma quadrícula com 5 cm de lado. A seguir inicia-se a colagem das

pastilhas metálicas no provete aplicando-se uma fina camada de cola epóxi e unindo-as logo a seguir. Por se tratar de uma cola com dois componentes foi necessário misturá-los previamente, sendo depois este misturado diretamente na pastilha, a fim de evitar desperdícios. Essa colagem teve de ser realizada 48 horas antes do ensaio de arrancamento, a fim de garantir a aderência e efetiva secagem da cola. O arrancamento é efetuado através do equipamento de ensaio. O valor da força máxima foi registrado, bem como o tipo de rutura (Fig. 53).



Fig. 53: Passo a passo do ensaio de arrancamento

A tensão de rutura de arrancamento é fornecida diretamente pelo equipamento de ensaio, em MPa. Entretanto, quando é utilizada uma pastilha quadrada, em vez da circular, é necessário efetuar a conversão, através da seguinte expressão:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{eq} \times A_c}{A_q}$$

Onde:

$\sigma_c$  – Tensão equivalente a uma peça circular;

$\sigma_{eq}$  – Tensão extraída do equipamento quando utiliza peça quadrada;

$A_c$  – Área da superfície de contato da peça circular;

$A_q$  – Área da superfície de contato da peça quadrada.

### 6.6.3. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

#### 6.6.3.1. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Neste ensaio, em conformidade a norma EN 1015 –18 (2002), é possível determinar a absorção de água por capilaridade da argamassa no estado endurecido. A absorção é expressa pela diferença entre a massa do provete seco e a massa do provete de argamassa humedecido, por unidade de área, onde se coloca com uma das faces em contacto com água durante um tempo de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 24 h, 48 h e 72 h. A massa de água absorvida é dividida pela área da superfície de contacto com a água. O processo utilizado neste ensaio baseia-se na especificação do LNEC E393 e os materiais utilizados (Fig. 54) foram:

- Estufa ventilada;
- Balança;
- Varetas em pvc, para o apoio do provete;
- Campânula;
- Pipeta para manter o nível de água constante;
- Pano húmido para limpar o excesso de água no provete.
- Tabuleiro.

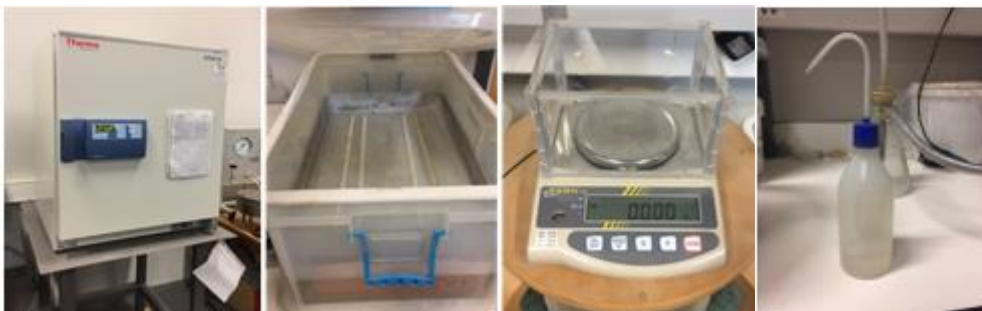


Fig. 54: Equipamentos para ensaio de capilaridade

Os procedimentos de ensaio iniciam-se da seguinte forma: em primeiro lugar, seca-se o provete até massa constante, tendo este sido previamente colocado durante 48 horas numa estufa a uma temperatura de  $60 \pm 5$  °C e temperatura. A seguir, dentro de uma caixa plástica coloca-se um tabuleiro com varetas de pvc, destinadas a suportar o provete e a manter a face inferior do provete em contacto com a água. Por se tratar de “metade de um provete”, efetua-se apenas a absorção de água por capilaridade em relação à massa. Entretanto, realiza-se uma limpeza dos resíduos antes da pesagem de todos os provetes, para que não existam alterações na sua massa, devido a possíveis perdas de material. Marca-se no provete, com uma caneta, uma linha  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior deste. Posiciona-se o provete sobre as varetas, de modo a que este fique apoiado sobre a sua menor face. Coloca-se água no tabuleiro até que o nível atinja a marcação efetuada anteriormente, evitando que as restantes faces fiquem molhadas. O tabuleiro é coberto com uma campânula, de forma a reduzir a evaporação da água e com humidade relativa de  $95\% \pm 5\%$  e temperatura de  $20$  °C  $\pm 2$  °C. O nível da água é mantido durante todo o ensaio, adicionando água com uma pipeta quando há



perda por evaporação. Foram feitas medições à massa de água absorvida por capilaridade, nos tempos de ensaio já mencionados. Para se efetuar uma medição, retira-se a campânula e o provete do tabuleiro. Seca-se a água livre com um pano húmido e, em seguida, coloca-se o provete na balança e regista-se a massa  $M$  relativa ao tempo  $t$ . Por fim, coloca-se o provete novamente dentro do recipiente sobre as varetas e, se necessário, corrige-se o nível da água no tabuleiro. A Fig. 55 mostra os passos realizados no ensaio.

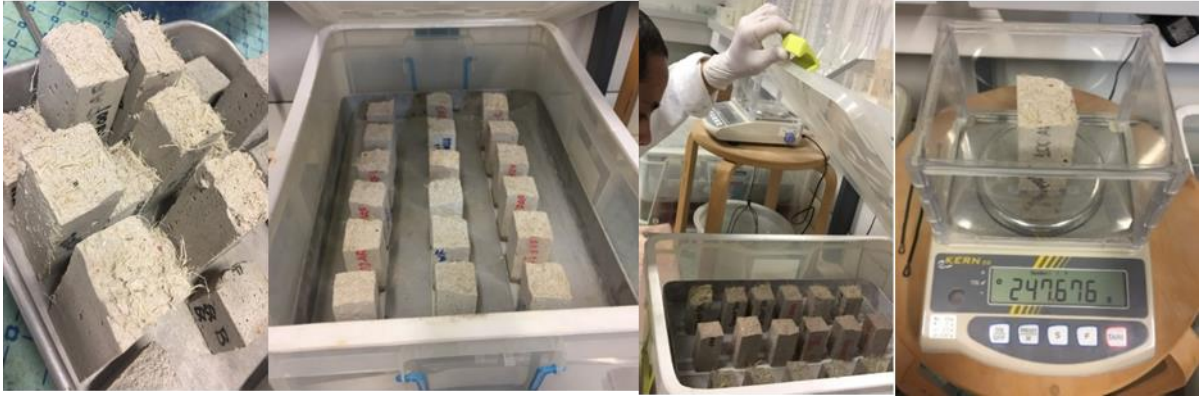


Fig. 55: Ensaio de capilaridade

A água absorvida por unidade de área,  $W_s$ , é dada pela expressão

$$W_s = \frac{M(t) - M_i}{A} \quad , \text{ dada em } g/m^2$$

Onde,

$M(t)$  – Massa do provete no tempo  $t$  em g,

$M_i$  – Massa inicial do provete em g,

$A$  – Área da superfície em contacto com a água.

#### 6.6.3.2. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA

Porosidade aberta é a relação entre o volume de vazios (poros, capilares, fraturas) acessíveis à água e o volume aparente da amostra (volume da massa sólida mais o volume total de vazios). O ensaio para determinação da porosidade é um ensaio não destrutivo, cujo objetivo é determinar a massa de água que um provete de argamassa no estado endurecido consegue absorver durante 48 horas, quando imerso em água. A elaboração deste ensaio tem como base a NP EN 1936 (1999) e a especificação do LNEC E 394. A porosidade de uma argamassa é consequência do processo de amassadura, da cura, dos materiais e das quantidades escolhidas para a sua

elaboração. Os ensaios foram efetuados utilizando-se os materiais descritos abaixo (Fig. 56).

- Estufa;
- Balança;
- Exsicador.
- Recipiente com água;
- Bomba de vácuo.



Fig. 56: Equipamentos para o ensaio de porosidade aberta

O ensaio procedeu-se da seguinte forma: colocou-se os provetes na estufa a uma temperatura de 60°C, durante um período de 48 horas. Após esse período e com os provetes arrefecidos, previamente limpos (sem resíduos soltos para não comprometer o ensaio), fez-se as pesagens na balança (m1). Ao realizar cada pesagem, os provetes foram inseridos no exsicador durante um período de 24 horas, com a bomba ligada, com o objetivo de retirar o ar incluso nos poros dos provetes. Manteve-se os provetes no exsicador, com a bomba ligada e permitindo a entrada de água, até os provetes se encontrarem totalmente imersos (com introdução de água durante o mínimo de 15 minutos). Os provetes ficaram imersos no exsicador, com a bomba ligada, por um período de 24 horas. Após este período, a bomba foi desligada, permitindo-se a entrada de ar, pressão atmosférica, no exsicador durante um período de 24 horas de uma forma lenta (Fig. 57). Posteriormente, retirou-se os provetes do exsicador, determinando as medidas das suas massas imersas em água (m2) e saturadas (m3). Por fim, calculou-se a média da porosidade aberta para cada composição estudada, de acordo com a equação abaixo:

$$Pab(\%) = \frac{M3 - M1}{M3 - M2} \times 100$$

Onde:

Pab – Porosidade Aberta (%);

M1 - Massa do provete seco (gramas);

M2 - Massa do provete imerso (gramas);

M3 - Massa do provete saturado (gramas);



Fig. 57: Procedimentos para obtenção da porosidade aberta

#### 6.6.3.3. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

O ensaio de condutibilidade térmica tem como objetivo a verificação do comportamento do material (argamassa) quanto à sua capacidade de retenção térmica. Quanto menor for o valor, melhor o material neste sentido. Neste ensaio foi utilizado o equipamento *Isomet 2114*, conforme indicado na Fig. 58. Em relação ao procedimento de ensaio, programou-se o equipamento e colocou-se a sonda sobre o provete. Posteriormente, aguardou-se aproximadamente 20min para se obter o resultado.



Fig. 58: Equipamento utilizado no ensaio de condutibilidade térmica

#### 6.6.3.4. ULTRASSOM – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Neste ensaio pretende-se determinar o módulo de elasticidade dinâmico dos provetes produzidos. Para isso, foram submetidos os provetes com idade de 28 dias ao ensaio de velocidade de ultrassom, realizado de acordo com a norma europeia NP EN 14146. Para a realização deste ensaio foi utilizado apenas o equipamento de ultrassom e uma pasta dentífrica. Proceda-se ao ensaio inserindo pasta dentífrica nas duas faces menores do provete. De seguida, posiciona-se os transmissores do aparelho próximo do centro de ambas as faces e realiza-se a leitura, de forma computacional (Fig. 59). Aponta-se os valores da velocidade e calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico através da equação abaixo.

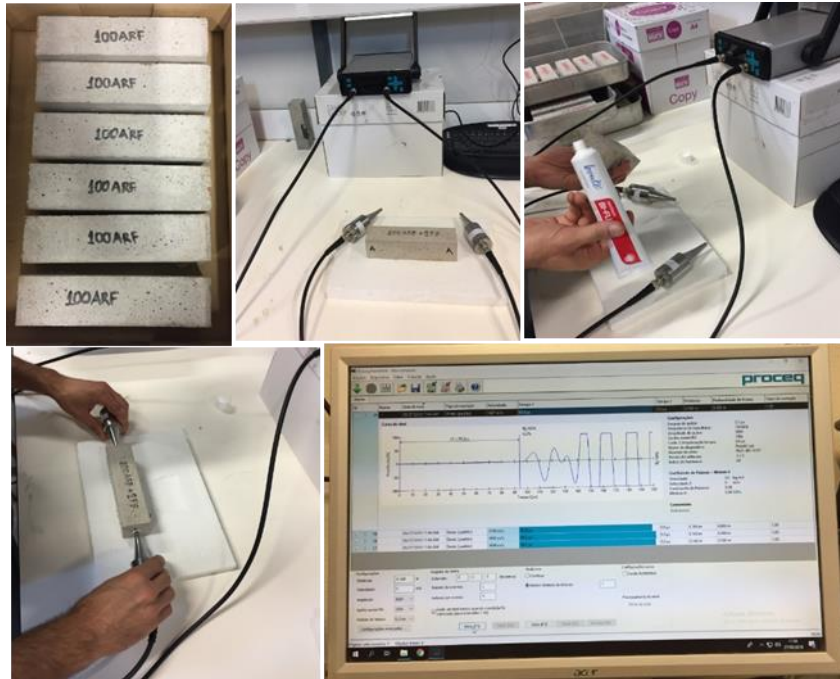


Fig. 59: Ensaio de Ultrassom

## 7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas. Os resultados são apresentados pela mesma ordem da descrição dos ensaios efetuada no capítulo anterior.

### 7.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA

#### 7.1.1. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Realizou-se uma análise granulométrica aos agregados finos naturais. Com essa granulometria foi produzido todo o material reciclado, a fim de se manter a mesma curva granulométrica (Figura 60). Cada análise foi efetuada com uma amostra de 226.9 g.

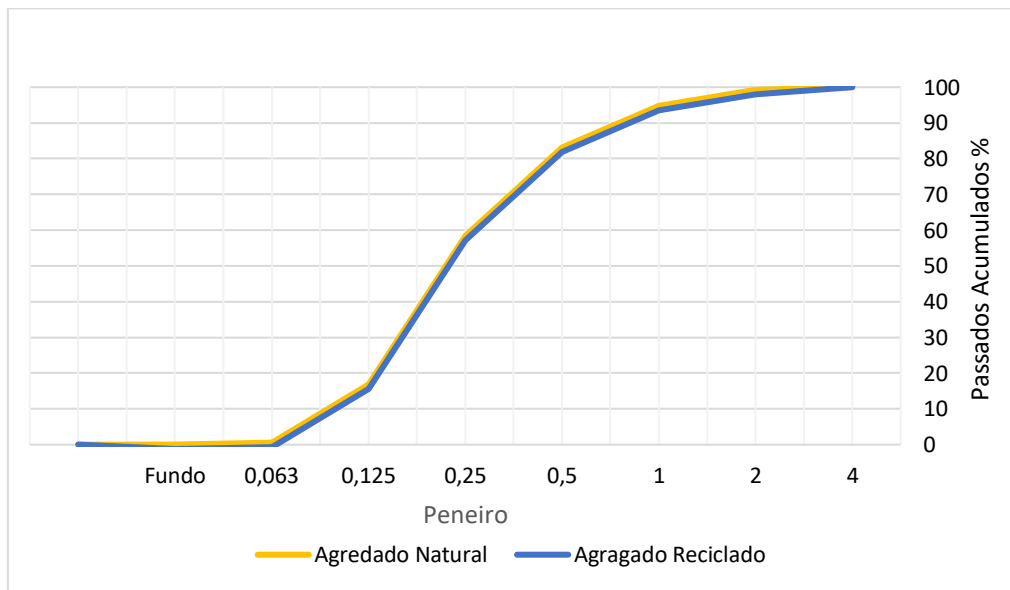


Fig. 60: Análise da granulometria dos agregados finos.

Manter a mesma curva granulométrica é fundamental para a caracterização dos agregados reciclados finos e para melhor comparação numérica aos agregados naturais.

### 7.1.2. RESULTADOS DAS BARIDADES DOS AGREGADOS

A seguir, apresenta-se, na Tabela 10, os valores das baridades obtidos para os agregados reciclados e naturais, bem como a do cimento e fibra de sisal.

Tabela 10: Baridade dos agregados finos, cimento e fibra de sisal.

BARIDADES DOS MATERIAIS		
Agregado Reciclado Fino (ARF)	1320	kg/m <sup>3</sup>
Agregado Natural Fino (ANF)	1582	kg/m <sup>3</sup>
Cimento	1200	kg/m <sup>3</sup>
Fibra de sisal	1080±30	kg/m <sup>3</sup>

Nota-se que a baridade do agregado reciclado é inferior em relação ao agregado natural. Este facto, possivelmente, é devido aos materiais contidos no RCD terem baixas massas volúmicas, tais como os cerâmicos, entre outros componentes.

### 7.2. RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

#### 7.2.1. RESULTADO DA RELAÇÃO ÁGUA-LIGANTE

A relação água/ligante, conforme informada no capítulo anterior, foi definida experimentalmente de forma a que se pudesse obter uma consistência considerável para a investigação, sempre com a introdução de 2% de adjuvante para controlo da perda de água. Como se pode observar na Tabela 11, obtiveram-se valores de relação água/ligante entre 0,55 e 0,80.

Tabela 11: Relação água-ligante

Relação água ligante		
100ANF 100ANF1FS 100ANF2FS	50ANF50ARF 50ANF50ARF1FS 50ANF50ARF2FS	100ANF 100ANF1FS 100ANF2FS
0,55	0,65	0,80

Destaque-se que, com o aumento da quantidade de agregados reciclados finos (ARF),

a relação água/ligante também aumenta, ou seja, o aumento da quantidade de água na amassadura está diretamente proporcional ao aumento da quantidade de ARF. Isso já se esperava, uma vez que nos agregados reciclados finos existem diversos materiais que têm características físicas que provocam um aumento da absorção de água dos agregados que ocorre durante a amassadura.

## 7.2.2. RESULTADOS DAS CONSISTÊNCIAS POR ESPALHAMENTO

O espalhamento, por sua vez, foi cuidadosamente controlado, mantendo-se entre 155 mm e 165 mm, a fim de garantir uma consistência/trabalhabilidade para reboco, mantendo-se por toda a investigação (Fig. 61).

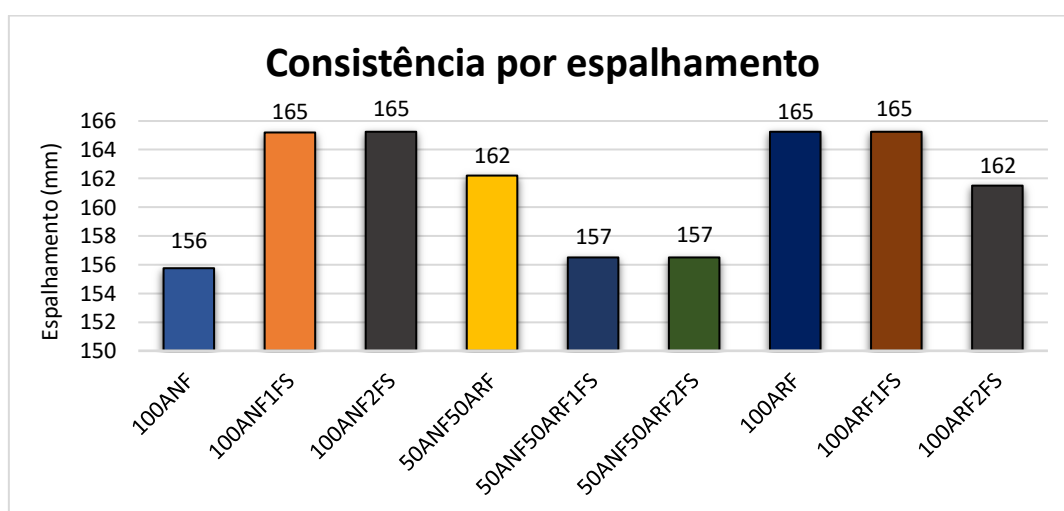


Fig. 61: Resultados do espalhamento

## 7.2.3. RESULTADO DO TEOR DE AR

Este ensaio foi efetuado para todas as amassaduras. Para a determinação do teor de ar e da massa volúmica aparente, utilizou-se o traço em massa. Na Fig. 62 estão exibidos os resultados obtidos.



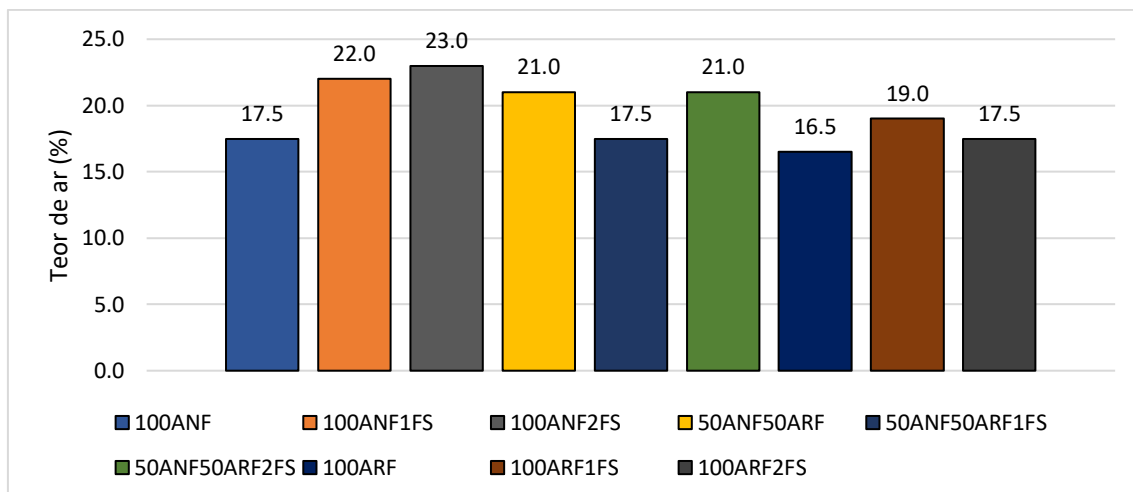


Fig. 62: Resultados do teor de ar das argamassas estudadas

Foi verificado, através dos resultados apresentados, que a quantidade de ar na amassadura ficou entre os 16.5% e os 23%. Nas argamassas com agregados naturais verifica-se um aumento do teor de ar com a adição de fibras de sisal. Esta aumento atinge os 31,4%, aquando da adição de 2% de fibras.

#### 7.2.4. RESULTADO DA MASSA VOLÚMICA APARENTE

Este ensaio foi efetuado para todas as argamassas produzidas. Em toda a produção foi utilizado o traço em massa. Na Fig. 63 estão exibidos os resultados obtidos. Observa-se que com o aumento de agregados reciclados a massa volúmica é reduzida de forma proporcional. Este facto já era de esperar, uma vez que a baridade dos agregados reciclados é inferior à dos agregados naturais.

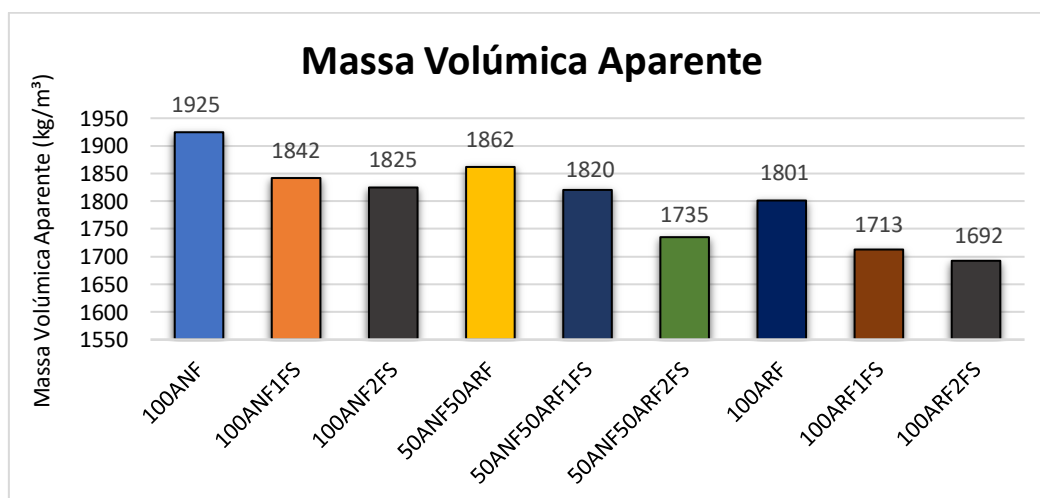


Fig. 63: Resultado da massa volúmica aparente.



Por outro lado, o aumento da taxa de Sisal também faz com que a massa volúmica aparente seja reduzida. Isso ocorre pelo facto de o Sisal ter massa volúmica baixa e por ocupar um volume considerável na argamassa, mesmo tendo em conta a quantidade de água nele retido.

### 7.3. RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

#### 7.3.1. RESULTADO DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Este ensaio foi efetuado para todas as amassaduras, a fim de se determinar a resistência à tração por flexão e à compressão. Na Figura 64 estão apresentados os resultados destes dois ensaios realizados.

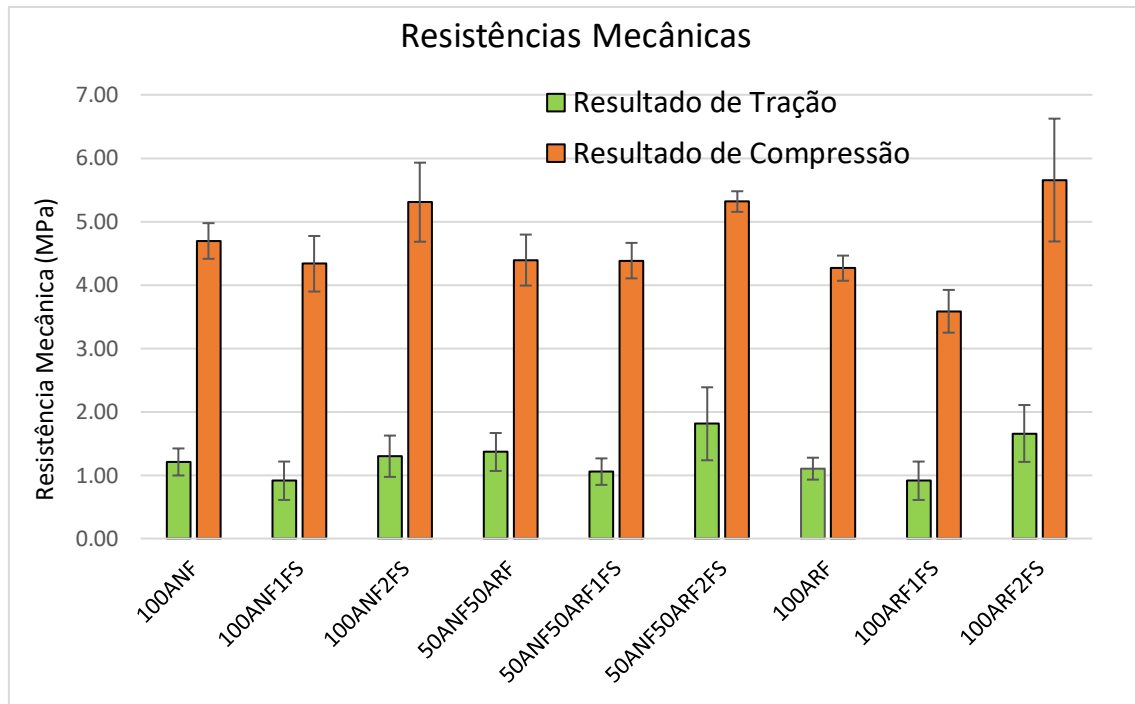


Fig. 64: Resultado das resistências mecânicas

Os valores para compressão ficaram bem elevados para uma argamassa de reboco, ficando acima dos 0,4 MPa conforme a norma EN 998-1, facto que poderia ser reduzido a quantidade de cimento nas amassaduras para tal função.

De acordo com os resultados obtidos por Bruno (2007), uma argamassa de traço 1:3 em volume de areia natural, possui valores para a tração por flexão de 4,5 MPa e de compressão de 18,8MPa.

Foi possível verificar através do ensaio de tração que, a utilização de AR não provoca uma diminuição desta propriedade. Pelo contrário, aquando da utilização simultânea de fibras de Sisal, a utilização de AR parece provocar um aumento da resistência à tração.

Por sua vez, importa referir que a utilização de fibras de Sisal com teores de 2% parece aumentar significativamente a resistência à tração. Este facto comprova que a utilização

destas fibras consegue promover um aumento da resistência da argamassa.

Relativamente ao ensaio de resistência à compressão, pode-se verificar que a utilização de AR em argamassas provoca uma diminuição desta propriedade. Nas argamassas sem fibras de Sisal, este decréscimo atingiu os 9,2%.

Sobre a utilização de fibras de Sisal, verificou-se que estas fibras também melhoraram significativamente a resistência à compressão das argamassas. No que se refere às argamassas com AN, pôde-se constatar que a utilização de fibras de Sisal provocou uma melhoria mais significativa na resistência à compressão (13,0%) do que na resistência à tração (7,5%).

Observa-se também que, nos ensaios à tração, o desvio padrão foi maior nas amassaduras com teor de Sisal em 2%. Ou seja, nas argamassas com Sisal obtém-se uma variação superior das resistências, na mesma amassadura, em diferentes provetes. Este facto deve-se possivelmente à importância da distribuição das fibras no provete. Em relação aos resultados dos ensaios à compressão, a maior variância foi observada na amassadura com agregados reciclados e com o teor de Sisal de 2%.

Como se pode observar através da Tabela 12, a introdução de 2% de fibras de Sisal, provocou uma melhoria da resistência mecânica (tração e compressão) muito superior no caso das argamassas com AR, comparativamente às argamassas com AN.

Tabela 12: Influência da utilização de 2% de fibras de Sisal na resistência mecânica

ARGAMASSAS	TRAÇÃO	COMPRESSÃO
0% DE AR	7.5%	13.0%
50% DE AR	32.6%	21.0%
100% DE AR	50.4%	32.6%

Através da Figura 65, é possível analisar a relação entre as resistências mecânicas

(compressão e tração por flexão). Como se pode observar pelo coeficiente de regressão obtido (0,69), existe uma relação aproximadamente linear entre estas duas propriedades.

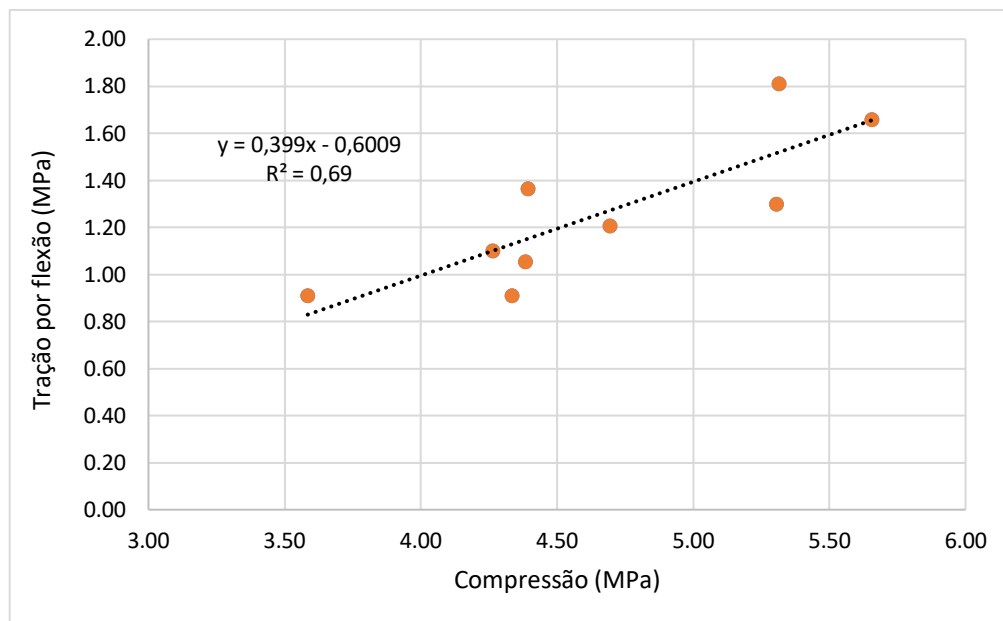


Fig. 65- Comparativo entre as resistências mecânicas

### 7.3.2. RESULTADO DE ARRANCAMENTO POR TRAÇÃO [PULL-OFF]

No ensaio de arrancamento por tração das argamassas aplicadas em tijolos, não se obtiveram resultados plausíveis, conforme mostrado na Tabela 13. Verifica-se que, em todos os ensaios efetuados, a rutura foi adesiva. (Figuras 66 e 67).

Tabela 13: Resultados do arrancamento das argamassas em tijolos

AMASSADURA/TIJOLO	MEDIA DAS TENSÕES (MPa)
100ARF2FS	0.06
50ANF50ARF2FS	0.07
100ANF2FS	0.07
100ARF1FS	0.06
50ANF50ARF1FS	0.07
100ANF1FS	0.07
100ARF	0.06
50ANF50ARF	0.06
100ANF	0.06

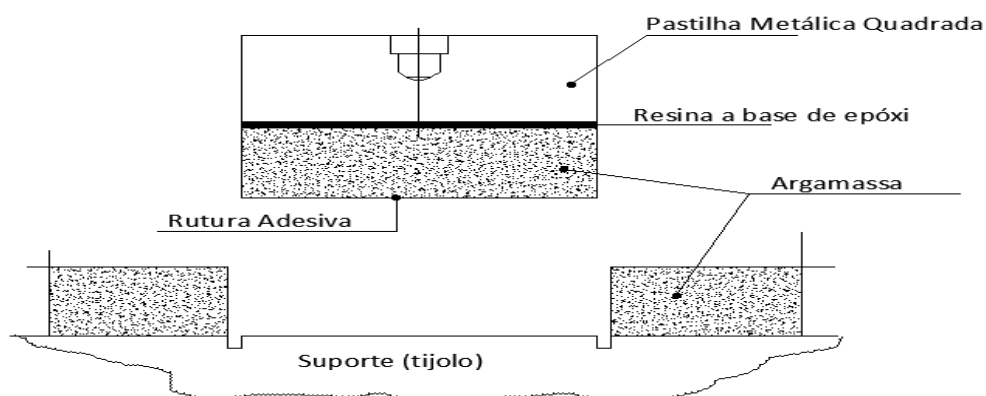


Fig. 66: Representação do tipo de rutura ocorrida nos ensaios



Fig. 67: Rutura da argamassa no suporte.

Os resultados, também, podem ser verificados na Fig. 68, junto com seus respectivos desvios, para melhor análise.

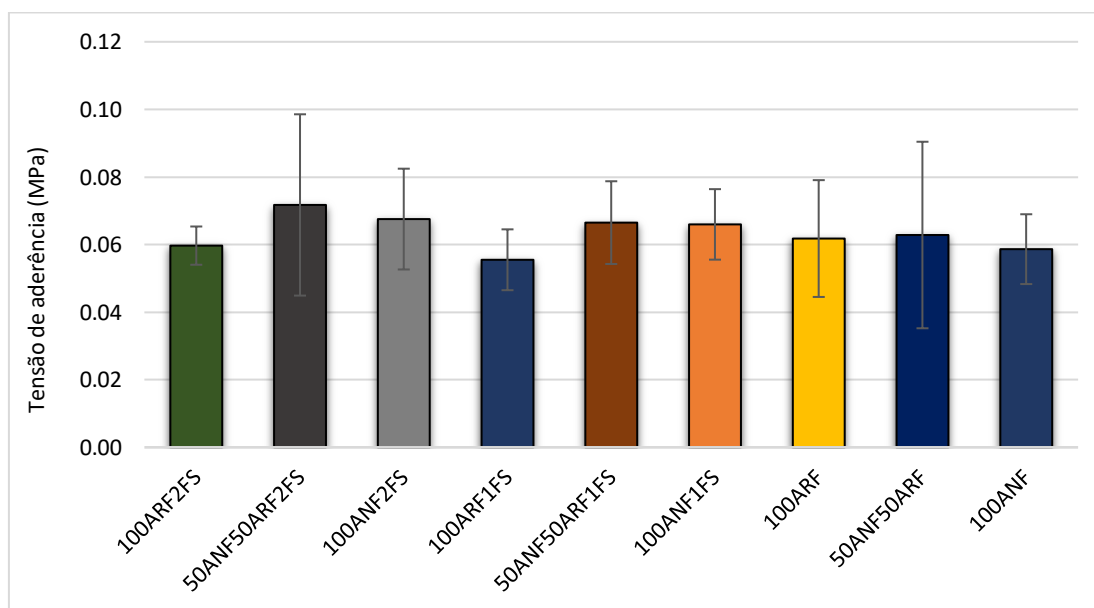


Fig. 68: Valores das tensões de arrancamento dos ensaios realizados

Os resultados obtidos tiveram valores muito baixo. Alguns fatores podem ter influenciado a baixa resistência no arrancamento, tais como:

- Tipo de suporte: Tijolos de argilosos com baixa porosidade, dificultando a aderência da argamassa em sua estrutura;
- Teor de humidade no suporte: Mesmo que a influência da humidade nos tijolos não seja um agravante principal, o mesmo passa a ter uma participação considerável;
- O tipo de argamassa: A relação água/ligante que influencia na trabalhabilidade do material pode contribuir na baixa resistência no arrancamento;
- A espessura: A escolha de 2cm de espessura para o reboco dos tijolos podem ter influenciado nos resultados negativos obtidos;
- A idade do reboco: Sua participação pode não ter uma consideração impactante, mas trata-se de mais uma variável;
- As condições atmosféricas durante a aplicação: A variação de humidade e temperatura podem somar-se aos conjuntos de influenciadores da baixa resistência;
- Energia Potencial: Por fim, o facto de se ter determinado uma altura de lançamento da argamassa de aproximadamente 35 cm, pode não ter sido uma ótima escolha para a análise dos resultados, uma vez que assim o seu impacto no tijolo não foi tão substancial a ponto de se obter um resultado plausível. Acredita-se que este último ponto, teve uma influência significativa nos resultados obtidos.
- Vibrações no momento do corte (entalhes);

#### 7.4. RESULTADOS DAS AVALIAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

##### 7.4.1. RESULTADO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados provenientes dos ensaios efetuados nas argamassas estão dispostos abaixo (Fig. 69).

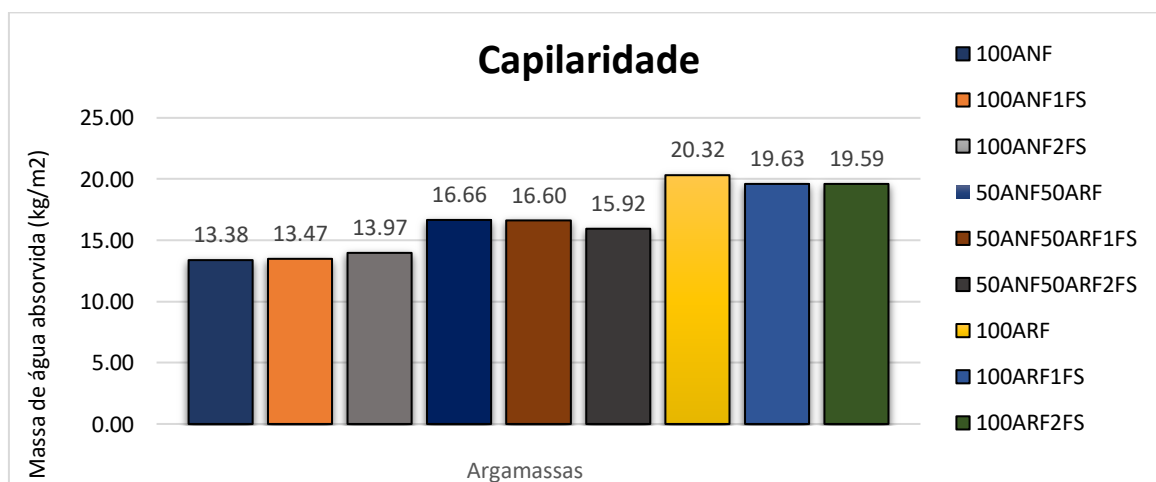


Fig. 69: Resultados das capilaridades após 72 horas.

Refira-se que as argamassas com maior teor de agregados reciclados finos obtiveram valores maiores de absorção de água. Isso é explicado pela elevada absorção de água dos componentes dos RCD utilizados na amassadura. Entretanto, destaque-se também o facto de as argamassas com agregados finos naturais aumentarem ligeiramente a sua absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de Sisal. Estes resultados devem-se à significativa absorção de água das fibras de Sisal.

Por outro lado, nas argamassas com agregados reciclados finos existe uma redução da absorção de água quando se aumenta o teor de fibras. A possível causa para esta redução é o facto de a introdução de fibras de Sisal implicar uma diminuição do volume de agregados reciclados (volume ocupado pelas fibras). Assim sendo, como a absorção de água destes agregados é ainda superior à das fibras, ao se diminuir ligeiramente a quantidade de agregados reciclados presente nos provetes, a absorção de água por capilaridade diminui. A figura 70 apresenta as curvas de capilaridade para efeito de comparação entre as argamassas.

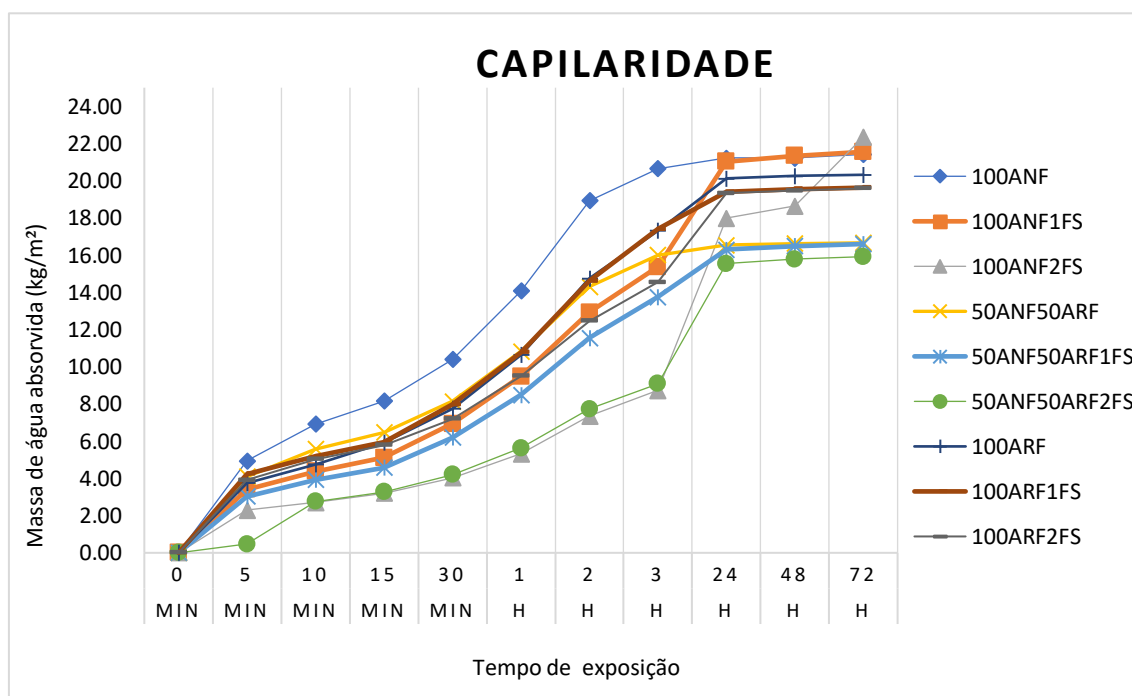


Fig. 70- Curvas das capilaridades das argamassas ensaiadas

#### 7.4.2. RESULTADO DA POROSIDADE ABERTA

Abaixo estão explícitos os resultados obtidos nos ensaios de porosidade aberta (Fig. 71). Em relação à porosidade das argamassas, observa-se que, quando são inseridas na amassadura fibras de Sisal, a porosidade das argamassas aumenta ligeiramente.

O acréscimo da quantidade de AR utilizada provocou um aumento significativo da porosidade das argamassas, tal como esperado. Este aumento atingiu os 21%, aquando da substituição total dos agregados na argamassa com 1% de fibras de Sisal.

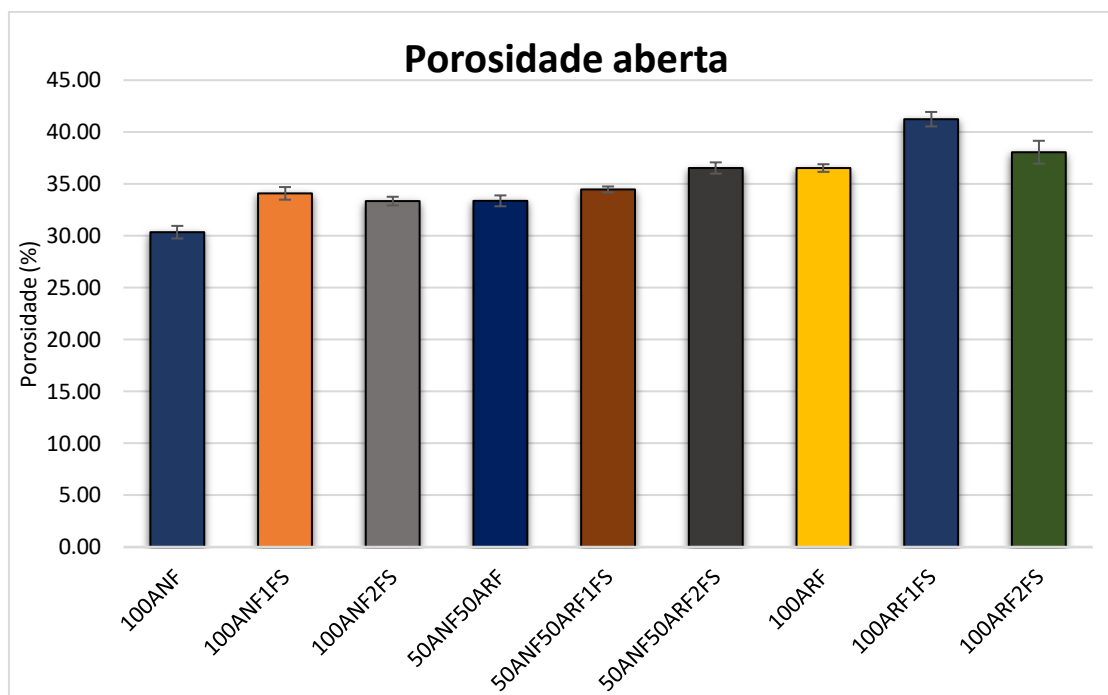


Fig. 71: Resultados da porosidade aberta

Através da Figura 72 pode-se analisar a relação entre a porosidade aberta e a capilaridade em todas as argamassas produzidas nesta investigação. Como se pode observar pelo coeficiente de regressão obtido (0,63), existe uma relação aproximadamente linear entre estas duas propriedades.

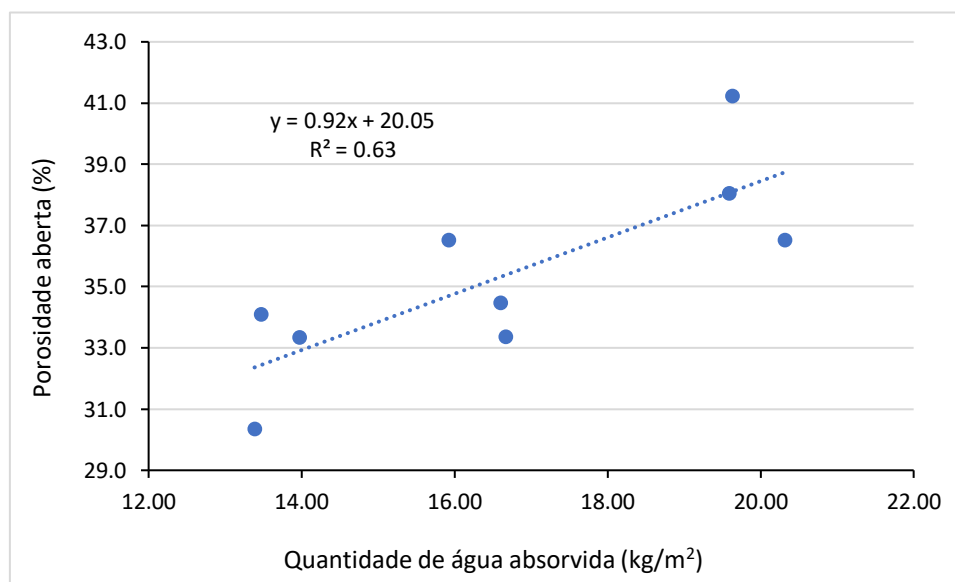


Fig. 72: Relação entre a porosidade aberta e a absorção de água por capilaridade

#### 7.4.3. RESULTADO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

Todos os provetes, antes mesmo de serem submetidos aos ensaios de Capilaridade e Porosidade Aberta, foram submetidos ao ensaio de condutibilidade térmica. Através deste ensaio, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados da condutibilidade térmica dos materiais estudados

Argamassa	Média das Condutibilidades Térmicas (W/m.k)	Desvio Padrão (W/m.k)
100ANF	0.91	0.0013
100ANF1FS	0.79	0.0024
100ANF2FS	0.81	0.0005
100ARF	0.61	0.0001
100ARF1FS	0.55	0.0003
100ARF2FS	0.63	0.0005
50ANF50ARF	0.76	0.0004
50ANF50ARF1FS	0.71	0.0011
50ANF50ARF2FS	0.73	0.0006

Observa-se que se obtiveram menores valores de condutibilidade térmica em todos os provetes que continham fibras de Sisal e/ou agregados reciclados finos. Nos provetes com 100% de ARF e 1% de fibras de Sisal o resultado foi surpreendente, superando as expectativas, pois obteve-se um valor próximo de 0.60 W/m.k. Entretanto, destaque-se que, com o aumento do teor de fibras de 1% para 2%, os resultados parecem indicar uma ligeira elevação na condutibilidade térmica (Fig. 73).

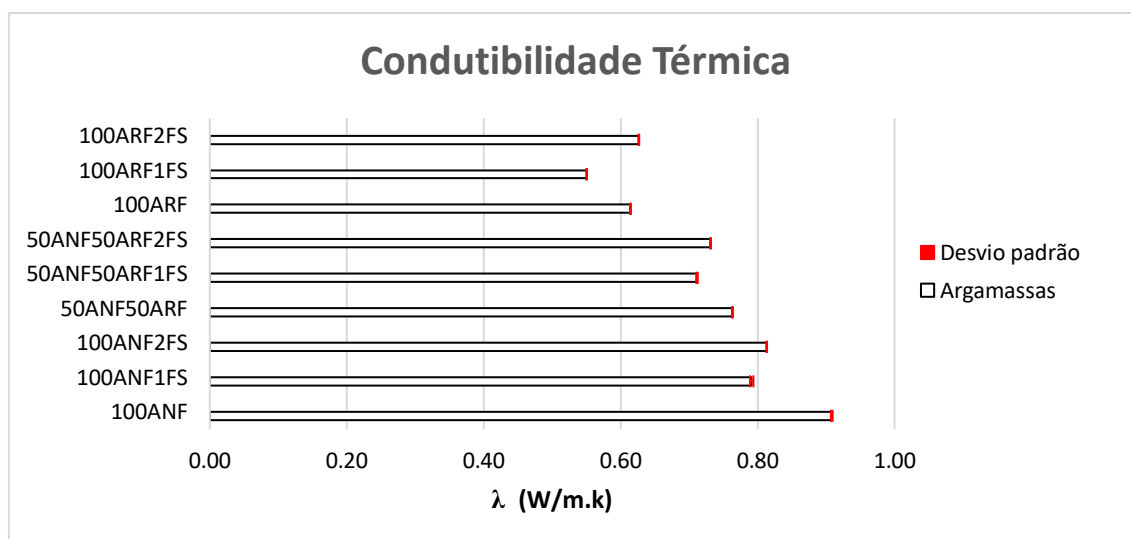


Fig. 73: Resultados das condutibilidades térmica

Estes resultados estão relacionados com o tipo de material (agregado), ou seja, de



acordo com o gráfico de tendência, quanto maior a porosidade das argamassas, menor a condutibilidade térmica das mesmas. Na Figura 74 mostra que existe uma relação linear entre a porosidade das argamassas e a sua condutibilidade térmica, tal como comprova o elevado coeficiente de regressão linear obtido (0,88).

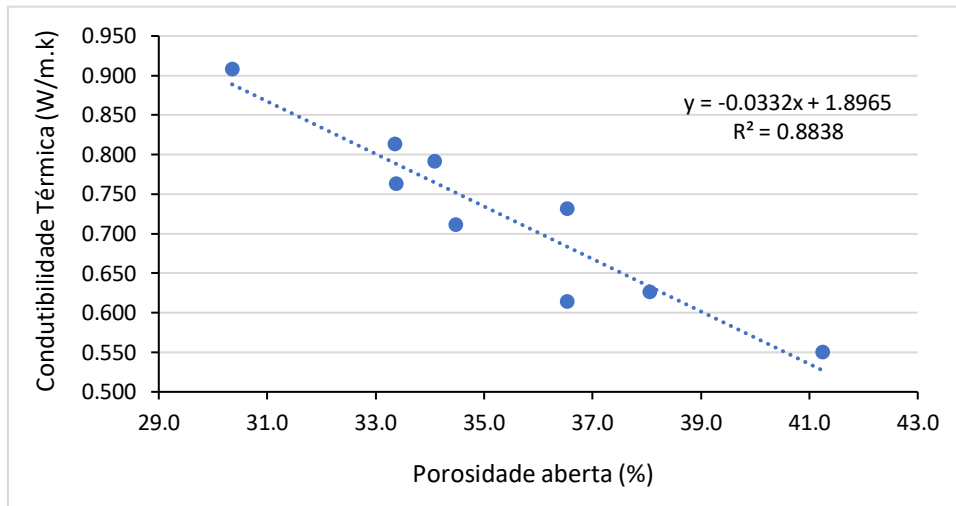


Fig. 74: Relação entre a condutibilidade térmica e a porosidade aberta

Em se tratando de comparativo entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica no estado endurecido, o coeficiente de regressão linear obtido (-0,047) no gráfico da Figura 75, mostra que não serve de parâmetro de análise.

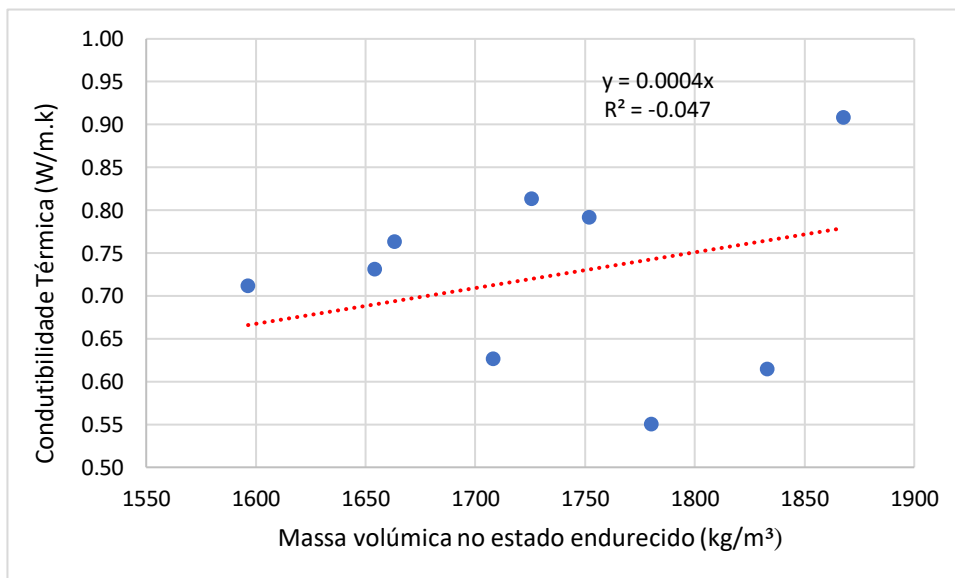


Fig. 75- Relação entre a condutibilidade térmica e a massa volúmica no estado endurecido

#### 7.4.4. RESULTADO DOS ENSAIOS DE ULTRASSOM – MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Todos os provetes, antes mesmo de serem submetidos aos ensaios mecânicos, foram ensaiados ao módulo de elasticidade dinâmico. Obtiveram-se os resultados presentes na Fig. 76.

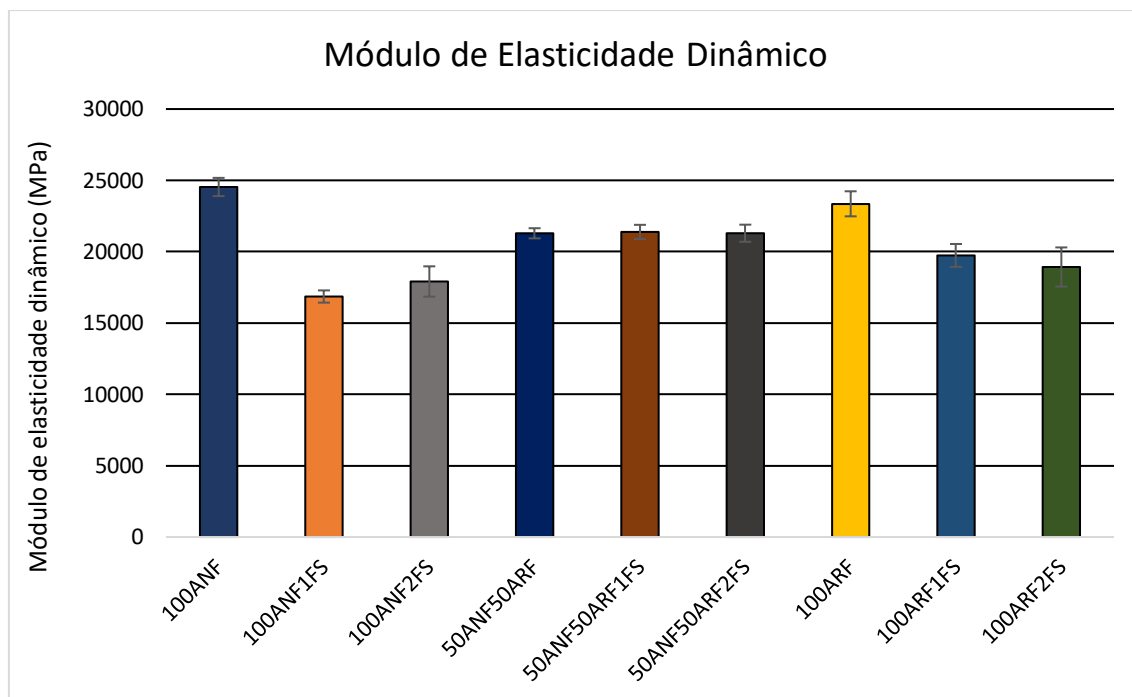


Fig. 76: Resultados dos Módulos de Elasticidade Dinâmico.

Os resultados mostram valores interessantes sobre o uso de agregados reciclados em argamassas. Desde logo, constata-se que os resultados obtidos nas argamassas com 100% ARF e 100% ANF são muito semelhantes. No entanto, para a argamassa com 50% de agregados reciclados finos obteve-se um valor menor de módulo de elasticidade do que para a argamassa com 100% de agregados reciclados, o que parece indicar que um destes valores é anómalo. Outro aspeto curioso consiste no facto de, relativamente às argamassas com AN, os provetes com teor de fibras de Sisal de 1% terem um módulo de elasticidade menor do que os provetes com 2% de fibras de Sisal. No entanto, nos provetes com agregados reciclados, obteve-se precisamente o contrário. Mesmo considerando-se que este facto não seria expectável, importa ressaltar que, em todos os casos, as diferenças entre as argamassas com 1% e 2% de fibras de Sisal são muito pouco significativas. Apesar destas análises anteriores, importa principalmente referir que parece claro que a introdução de fibras de Sisal diminui o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas.

A Figura 77 permite verificar a relação entre os resultados obtidos no módulo de elasticidade dinâmico e os valores obtidos no teor de ar. Assim, pode-se observar que existe uma relativa relação linear entre estas duas propriedades ( $R^2$  de 0,43).

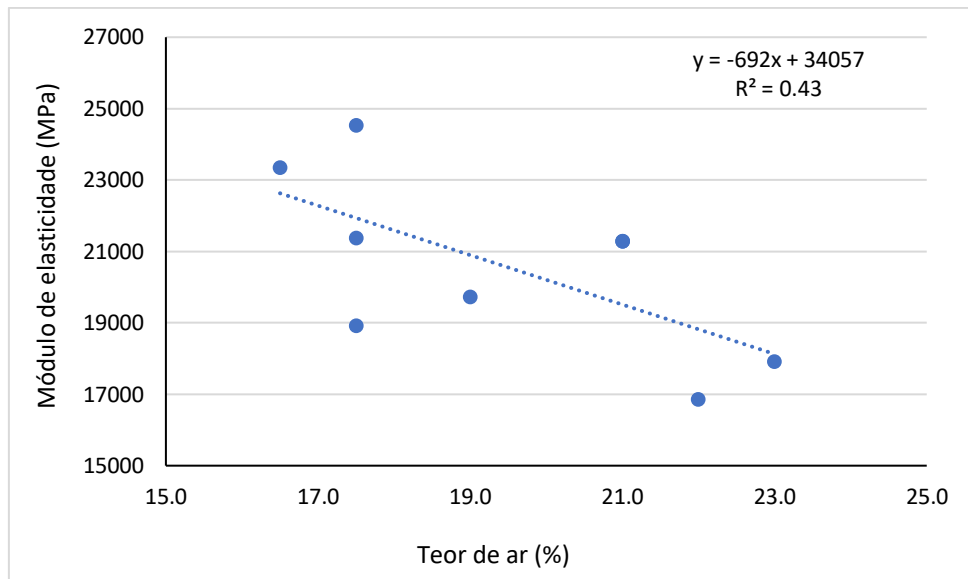


Fig. 77: Relação entre o módulo de elasticidade e o teor de ar

Na Figura 78 permite verificar a relação entre os resultados obtidos no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência a compressão não se obteve valores significativos na relação linear entre estas duas propriedades ( $R^2$  de 0,03).

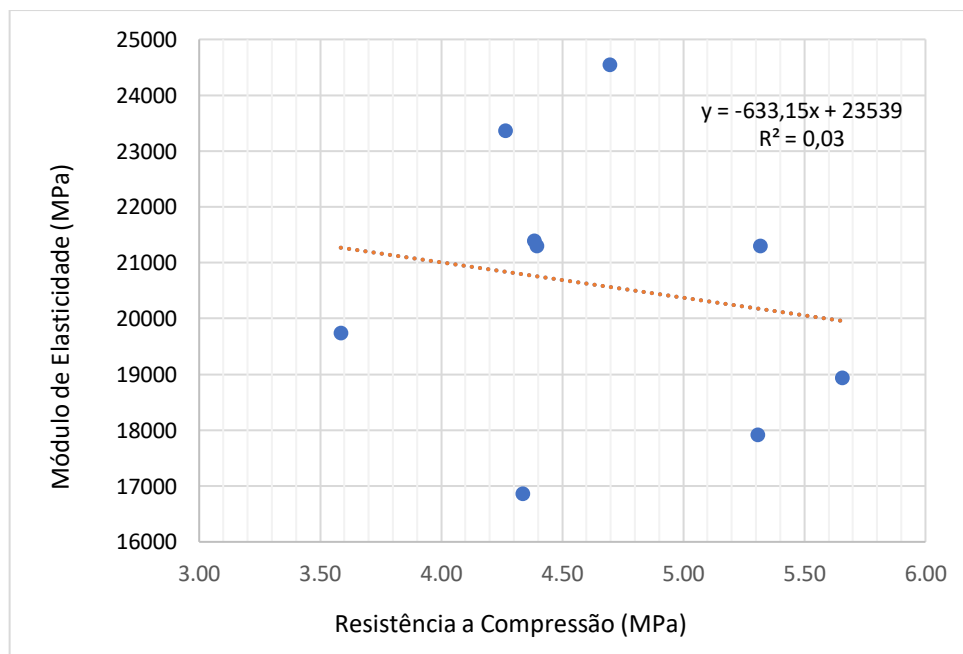


Fig. 78- Relação entre o módulo de elasticidade e resistência a compressão

## **8. CONCLUSÕES**

Pretende-se, neste capítulo, apresentar as conclusões impostas aos trabalhos efetuados em função dos resultados obtidos, bem como propor um desenvolvimento de futuros trabalhos de investigação.

### **8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Relativamente ao conteúdo da presente dissertação, importa recordar que o objetivo principal deste trabalho foi a caracterização de argamassas com RCD reforçadas com fibras de Sisal. Para tal, produziram-se argamassas com um traço de 1:3, por serem as mais utilizadas nas construções. Os materiais provenientes de RCD, foram recolhidos em sacos de uma demolição de uma residência, situada na freguesia do Lavradio, no Concelho do Barreiro. Nesta dissertação, também foram utilizados agregados naturais finos (ANF) e ligantes correntes (cimento), que foram obtidos pela instituição. Refira-se que o cimento utilizado foi do tipo CEM II/B-L 32,5N, da Secil, conforme caracterizado no item 6.2.5 e tabela 10 da presente dissertação.

A presente dissertação iniciou-se no mês de março do ano de 2019, com levantamentos bibliográficos (estado da arte) e com a obtenção dos materiais, ora citados, para a produção das argamassas. A planificação da produção e dos ensaios das argamassas, foi entregue em fevereiro do mesmo ano. Entretanto, as produções, bem como todos os ensaios, decorreram entre os meses de março e junho. Toda a parte escrita, dos ensaios, resultados e discursões, da presente dissertação, teve início no 1º dia do mês de setembro, sendo que o estado de arte foi escrito anteriormente (durante a produção das argamassas). A dissertação foi finalizada no fim do mês de novembro para submissão.

Na presente campanha experimental iniciou com a realização de ensaios aos agregados utilizados. A granulometria dos agregados finos foi rigorosamente calculada, a fim de se conseguir manter a granulometria dos agregados reciclados (AR) muito próxima da dos AN. Relativamente à baridade dos agregados, refira-se que o valor obtido para os AR é 16,6% inferior ao dos AN.

Relativamente aos ensaios efetuados às argamassas no estado fresco e, conforme apresentado nesta dissertação, começou-se por determinar a relação água/ligante necessária para cada argamassa, de modo a se obter uma consistência trabalhável, idêntica em todas as amassaduras. No ensaio da massa volúmica aparente obtiveram-se resultados já esperados, em função das diferentes baridades dos AN e dos AR. Destaque-se para o facto de, ao se inserirem teores maiores de fibras de sisal, é isto que diz a massa volúmica ter diminuído. Este resultado pode-se explicar pela reduzida massa volúmica destas fibras. No ensaio de determinação do teor de ar obtiveram-se valores entre 16,5% e 23%, tendo-se obtido um valor médio geral de todas as amassaduras próximo dos 19,5%, que se considera um resultado aceitável.

Como referido, ao longo da presente campanha experimental, foram realizados diversos

ensaios às argamassas no estado endurecido. Relativamente aos ensaios mecânicos, destaque-se o facto de a utilização de fibras de Sisal permitir uma melhoria da resistência à tração e da resistência à compressão. Foi também possível concluir que, nas argamassas com AR, a introdução de 2% de fibras de Sisal provocou uma melhoria da resistência mecânica (tração e compressão) muito superior àquela que se verificou nas argamassas com AN.

No ensaio de arrancamento [pull-off] não se obtiveram resultados satisfatórios. Considera-se que o motivo pelo insucesso verificado se deve ao facto de se ter escolhido um tipo de lançamento da argamassa inadequado. Ou seja, utilizou-se uma altura de lançamento de aproximadamente 35 cm, que aparentemente não foi suficiente para se criar uma aderência adequada ao suporte.

Através dos ensaios de capilaridade, pôde-se concluir que, tal como esperado, a introdução dos AR originou um aumento significativo desta propriedade, devido à capacidade de absorção de água dos materiais que constituem os agregados reciclados. Por sua vez, a introdução das fibras de Sisal, devido à sua elevada absorção de água, aumenta a absorção de água por capilaridade nas argamassas com AN. Pelo contrário, a utilização de fibras nas argamassas com AR diminui a sua capilaridade. Foi possível concluir que este resultado se deve à diminuição da quantidade de AR, em consequência do aumento da quantidade de fibras de Sisal presente nas amassaduras.

Em relação ao ensaio de porosidade aberta, foi possível concluir que a introdução de fibras de Sisal e a utilização de AR originaram um aumento desta propriedade. Este acréscimo atingiu os 10%, aquando da utilização de 2% de fibras de Sisal, os 20%, aquando da utilização de 100% de AR, e os 25%, aquando da utilização conjunta de 2% de fibras de Sisal e de 100% de AR.

Em relação ao ensaio de condutibilidade térmica, destaque-se a diminuição desta propriedade com a utilização de AR. Este decréscimo deve-se à maior porosidade destas argamassas e à composição destes AR (que incluem, por exemplo, materiais cerâmicos). Por sua vez, foi possível também concluir que a utilização de fibras de Sisal, devido à sua porosidade e composição, permitiu igualmente reduzir a condutibilidade térmica das argamassas.

Por fim, relativamente ao ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, conclui-se que a utilização de fibras de Sisal e de AR origina uma redução desta propriedade. Este decréscimo, que aparentemente se deve ao aumento da porosidade das argamassas, atingiu os 27%, aquando da utilização de 2% de fibras de Sisal, os 5%, aquando da utilização de 100% de AR, e os 23%, aquando da utilização conjunta de 2% de fibras de Sisal e de 100% de AR.

No contexto geral, pode-se concluir que a utilização de fibras de Sisal, para além de permitir a utilização de um material natural que existe em abundância, pode permitir a obtenção de argamassas com melhores características mecânicas e térmicas. Importa ressaltar que, apesar de não ter sido efetuada uma análise económica, considera-se que a utilização destas fibras permite a obtenção destas melhorias sem acréscimos consideráveis do custo, a depender de cada região.

Relativamente às argamassas com agregados reciclados finos obtiveram-se bons resultados, em alguns casos obtendo-se mesmo resultados surpreendentes. No caso dos ensaios mecânicos e da condutibilidade térmica, considera-se que os resultados obtidos superam as expectativas iniciais. Assim sendo, conclui-se que é possível realizar remodelações utilizando este tipo de agregados (AR), desde que se realize sempre um controlo rigoroso da composição dos AR.

Como é sabido, as questões da sustentabilidade estão sendo cada vez mais analisadas em revistas de projetos de construção. No entanto, ainda não se colocam habitualmente em prática estas soluções analisadas. Uma das razões para este facto consiste no medo existente no sector da construção de se submeter ao desconhecido, para além de outras questões culturais. O presente trabalho mostrou que é possível tratar os RCD e recuperá-los de forma a serem úteis dentro da construção civil, mesmo que seja para obras menos exigentes em termos estruturais. No fundo, o mais importante é minimizarem-se os impactos ambientais que tanto afetam o nosso planeta.

## **8.2. PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO FUTURO**

Considera-se que este estudo é bastante inovador e, como tal, precisa de ser desenvolvido em futuros planos experimentais (investigações). Destaque-se, de seguida, possíveis propostas para futuros trabalhos:

- a. Análise de argamassas com AR finos provenientes apenas de betão;
- b. Análise de argamassas com AR de granulometrias superior a 250 µm;
- c. Análise de argamassas com teores de fibras de Sisal de 2%, 3% e 4%;
- d. Análise de argamassas com AR e fibras de coco (FC);
- e. Análise de argamassas com AR e fibras de Juta (FJ);
- f. Análise de argamassas com AR e fibras de Sisal através da realização de ensaios de aderência em suportes diferentes, bem como através da utilização do lançamento da argamassa no método tradicional, com chapisco;
- g. Análise da utilização de plastificantes em argamassas com AR e fibras de Sisal;
- h. Análise da possibilidade de criação de argamassas com AR e fibras de Sisal com ligante de cal ou com dois ligantes.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Europeia do Ambiente - AEA (2010). *The European Environment - State and Outlook*, Publication Office of the EU, Luxembourg.

Agência Europeia do Ambiente - AEA (2018). *The European Environment - State and Outlook*, Publication Office of the EU.

Agência Portuguesa do Ambiente- APA (2008). *Resíduos de Construção e Demolição*, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Lisboa.

Agência Portuguesa do Ambiente -APA (2018). *Resíduos de Construção e Demolição*, Ministério do Ambiente do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Lisboa.

Aguiar, J. (2003). *Dos problemas aos conceitos: conservação, restauro e renovação de revestimentos exteriores em centros históricos*. 1º PATORREB. Porto, FEUP.

Amaral, F. (2005). *Agregados, slides de Materiais e Processos Construtivos EDI-33*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Paulo.

Asif, M.; Muneer, T.;Kelley, R. (2007). *Life cycle acessment: a case study of a dwelling home in Scotland*. Building and environment, V.42

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009). *ABNT NBR ISO 9001: 2008: Sistemas de gestão da qualidade – Requisitos*, 2º edição.

Baêta, F.C.; Souza, C. F. (1997). *Ambiência em edificações rurais – conforto animal*. Viçosa, MG: Editora UFV, 246p

Barbieri, J.; Cajazeira, J. (2009). *Avaliação do Ciclo de Vida do produto como instrumento de gestão da cadeia de suprimento - o caso do papel reciclado*, XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, São Paulo.

Barros, E.; Jorge, F. (2008). *Gestão de RCD - Resíduos de Construção e Demolição na obra de ampliação do Aeroporto Francisco Sá Carneiro*, Revista da Faculdade de Ciências e Tecnologia do Porto ISS 1646-0499, pp. 62-74.

Becchio, C.; Corgnati, S.P.; Kindinis, A.; Pagliolico, S. (2009). *Improving environmental sustainability of concrete products: investigation on MWC thermal and mechanical properties*. Journal of Energy and Buildings, V. 41, n. ° 11, pp. 1127-1134.

Bentz, P.; Stutzman, E. (2006). *Curing, Hydration, and Microstructure of Cement Paste*. Aci Materials Journal September/ October, 2006

Bledzki, A.; Gassan, J. (1999). *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in Polymer Science, v.24, Issue 2, Pages 221-274

Brito, J.A. (1999). *Cidade versus entulho*. Seminário de desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2., São Paulo, 1999.

Bruno, V.M. (2007). *Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas, Influência do Ligante*. Dissertação de Mestrado-Instituto Superior Técnico., Lisboa, 2007.

Coelho, A. (2010). *Análise de viabilidade de implantação de centrais de reciclagem de resíduos da construção e demolição em Portugal*, Parte I: Estimativa da geração de resíduos de construção e demolição, Relatório do 1º ano de Bolsa de Pós-Doutoramento, relatório ICIST n.º 04/2010, IST, Lisboa. 92

Concrete & Cement Association of New Zealand - CCANZ (1999). *Placing & compacting concrete*, Engineered Concrete Solutions series, Graceville.

Drew, L.; Sachs, J.; Langer, W. (2004). *Aggregate and the environment*, Environmental awareness, serie 8, Americal Geological Institute, Alexandria.



Duarte, C.; Hendricks, I. (2010). *Ocean acidification: separating evidence from judgment*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, V. 89, n.º 2, pp. 186-190.

Elvingson, P.; Agren, C. (2004). *Air and Environment book*, published by Swedish NGO Secretariat on acid rain, Sweden.

Embrapa. (2008). *Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro*, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

Enterprise & Industry (2009) - European comission, construction overview. Disponível em <http://ec.europa.eu/enterprise/>.

FEIL, Alexandre André. SCHREIBER, Dusan. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados. Cad. EBAPE, v. 14, n. 3, jul./set. 2017.

Ferraris, C. (2001). *Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, V. 106, n.º 2, pp. 391-399.

Fiksel, J. (1997). *Ingeniería de diseño medioambiental, desarrollo integral de productos y procesos ecoeficientes*, McGrawHill, Madrid.

Gama, C. (2006). *Utilização de agregados reciclados*, Seminário sobre Gestão Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição, IST, Lisboa.

Gervásio, H. (2010). *Sustainable design and integral life-cycle analysis of bridges*, Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Gervásio, H. (2013). *Análise de ciclo de vida de casas em madeira*, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Giddings, B., Hopwood, B. (2002). *Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development*. Wiley Online Library, 30 October 2002

Gonçalves, P. (2007). *Betão com agregados reciclados, análise comentada da legislação existente*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST, Lisboa.

Horkoss, S.; Lteif, R.; Rizk, T. (2010). *Calculation of the C3A percentage in high sulfur clinker*, International Journal of Analytical Chemistry, V. 2010, n.º 1, pp. 1-5.

Huntzinger, D.; Eamon, T. (2009). *A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies*, Journal of Cleaner Production, V. 17, n.º 7, pp. 668-675. 93

Instituto nacional de resíduos - INR (2005). *Viabilidade económica de uma central de tratamento de Resíduos de Construção e Demolição*, Relatório LIFE03 ENV/P/000506.

John, V. M. (2000). *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*, Tese para a obtenção do Título de Livre Docente, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

John, V. M. (2003). *On the sustainability of concrete*, Journal of Industry and Environmental, V. 26, n.º 2-3, pp. 62-63.

Kolias, S.; Georgiou, C. (2005). *The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete*, Cement & Concrete Composites, V. 27, n.º

Langer, W. (1993). *Natural aggregates of the conterminous United States*, Document n.º 119.3:1594, U.S. Geological Survey Bulletin.

Leite, M. B. (2001). *Avaliação de propriedades mecânicas de concreto produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*, Tese de Doutorado, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Leitner, S.; Kruger, D.; Harvey, R.; Chesnaye, F. (2001). *Cost-effective reductions of non-CO2 greenhouse gases*, Energy Policy, V. 29, n.º 14, pp. 1325-1331.

Li, M., Simerly, R. (2000). *Environmental dynamism, capital structure and performance: a theoretical integration and an empirical test*. Wiley Online Library.

Lima, J. (1999). *Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e das suas aplicações em argamassas e concretos*, Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Maiti, S.; Agarwal, R. (2009). *Concrete and its quality*, The Indian Concrete Journal, V. 83, n.º 9, pp. 20-27.

Mália, M. (2010). *Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, IST, Lisboa.

Martins, I.; Antunes, A.; Freire, A.; Batista, F.; Fortunato, E.; Roque, A. (2008). *Utilização de RCD em Betão, Seminário sobre Resíduos de Construção e Demolição*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Mattoso, L.H.C, Martins, M.A., Forato L.A., Colnago, L.A (2006). *A solid state <sup>13</sup>C high resolution NMR study of raw and chemically treated sisal fibers*. Carbohydrate Polymers, V.64, issue 1, Pages 127-133.

Mwaikambo, L. Y.; Ansell, M. P. (2000). *The effect of chemical treatment on the properties of hemp, sisal, jute and kapok for composite reinforcement*. Die Angewandte Makromolekulare Chemic, v272, p.108-116

Nascimento, E. (2009). *Impactos ambientais gerados na construção de edifícios: contraste entre a norma e a prática*, trabalho final do curso de Engenharia Civil, Universidade Católica, Salvador.

Nettleman, D.; Khasnis, A. (2005). *Global Warming and Infectious Disease, Medical Research*, V. 36, n.º 6, pp. 689-696. 94

Oliveira M, *Avaliação experimental do efeito de adições na autorregeneração de argamassas de cimento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Setúbal-Escola Superior de Tecnologia do Barreiro. 2018.

Park, K.; Çopuroglu, O.; Yoon, I. (2007). *Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete*, Atmospheric Environment, V. 41, n.º 34, pp. 7274-7285.

Pereira, L.; Said, J.; Aguiar, J. (2004). *Viabilidade económica de uma central de tratamento de resíduos de construção e demolição*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães.

Picanço, M; Gavami, K (2008). *Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia*, 13 REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61(1): 13-18, jan. mar. 2008

Pinto, P. (2005). *Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SINDUSCON-SP*, Relatório Técnico, Obra Limpa, São Paulo.

Porrit, J. (2009). *The concrete industry sustainability performance report*, 1st Report, Concrete Center, part of the Mineral Products Associations, on behalf of the Concrete Industry Sustainable Construction Forum, Londres.

R. Hadjieva-Zaharieva, M. Ramos-Quebaud, E. Wirquin, F. Buyle-Bodin (2000). *Opportunities for implementation of recycled aggregates in production of durable concrete in building construction* A. Yeginobali (Ed.), Second International Symposium: Cement and Concrete Technology in the 2000s, Istanbul, Turkey, September 6–10, TCMB ed. vol., pp. 361-370

Radner, R.; Dutta, P. (2009). *A strategic analysis of global warming: theory and some numbers*, Journal of Economic Behaviour & Organization, V. 71, n.º 2, pp. 187-209.

Rovnaníková, P.; Cerný, R. (2002). *Transport processes in concrete*, Spon Press Book, ISBN 0- 415-24264-9.

Sanne, K; Imrell, A; Garling, A; Steen, B. (2008). *Development of interpretation keys for environmental product declarations*, Journal of Cleaner Production, V. 16, nº 5, pp. 598-604.

Singh, B.; Singh, S.; Singh B. (2004). *Some issues related to pumping of concrete*, The Indian Concrete Journal, V. 41, n.º 9, pp. 41-44.

Sonigo, P.; Hestin, M.; MIMID, S. (2010). *Management of construction and demolition waste in the EU*, stakeholders' workshop, Bio Intelligence Service, Brussels.

Sousa Coutinho, A. (1988). *Fabrico e propriedades do betão*, V. 1, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, pp. 133-138.

Tavares, L (2007). *The future of Portuguese public administration sciences in the 21<sup>st</sup> Century*, Wiley Online Library

Thai German Cooperation - TGC (2007). *Resource efficient C&DW management - concepts and strategies from abroad*, C&DW stakeholder workshop, Century Park Hotel, Bangkok.

Torgal, F.; Jalali, S. (2008). *Contributos do betão para a sustentabilidade da indústria da construção*, Revista Betão, n.º 21, pp. 37- 41.

Unit of Environmental Science and Technology - UEST (2006). *Development of the best management system for high priority waste streams in Cyprus*, project LIFE 03 TCY/CY/018, chapter 1, pp 36-40.

United States Geological Survey - USGS (2008). *Minerals commodity summary, anual report*, Washington.

United States Geological Survey -USGS (1999). *Natural aggregates foundation of America´s future*, USGS fact sheet FS 144-97, Washington.

Vázquez, E.; Alaezos, P.; Sanchez, M.; Aleza, F.; Barra, M.; Burón, M.; Castilla, J.; Dapena, E.; Etxeberria, M.; Francisco, G.; González, B.; Martínez, F.; Martínez, I.; Parra, J.; Polanco, J.; Sanabria, M. (2006). *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*, Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/5 Hormigón reciclado, Monografía M-11 ACHE, Madrid.

Veiga, J.; Ruivo, J. (2004). *Resíduos de construção e demolição: estratégia para um modelo de gestão*, relatório final de curso, Licenciatura em Engenharia do Ambiente, IST, Lisboa. 96

Veiga, M. R., Aguiar, J., Carvalho, F., Silva, A. S., & Silva, C. (2001). *Metodologias para caracterização e conservação de argamassas de revestimento de edifícios antigos*. Final report of the Project Oldrenders, jointly funded by the Agência de Inovação. Lisbon.

Vieira KRCF, Bazzo WA (2007). *Discussões acerca do aquecimento global: uma proposta CTS para abordar esse tema controverso em sala de aula*. Ciência & Ensino; 1 (número especial) pp.1-12

Wanner, H.; Eugster, W.; Bronnimann, S. (2001). *Photo- oxidant chemistry in the polluted boundary layer under changing UV B-radiation*, Atmospheric Environment, V. 35, n.º 22, pp. 3789- 3797.

Wilburn, D.; Goonan T. (1998). *Aggregates from natural and recycled sources, Economic assessments for constrution applications – a material flow analysis*, Report Circular 1176, Denver.